



**Paulo Nuno  
Gaspar Neto  
Biscaia**

**Valorização de resíduo de aviário, engaço e lamas.  
Compostagem e produção de agregados leves.**



**Paulo Nuno  
Gaspar Neto  
Biscaia**

**Valorização de resíduo de aviário, engaço e lamas.  
Compostagem e produção de agregados leves.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental Materiais e Valorização de Resíduos realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Ana Paula Duarte Gomes, Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e do Professor Doutor João António Labrincha Batista, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia e Cerâmica do Vidro da Universidade de Aveiro.

## **O júri**

Presidente:

Doutora Maria Isabel Aparício Paulo Fernandes Capela,  
Professora Associada da Universidade de Aveiro.

Vogais:

Doutor João António Labrincha Batista,  
Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro.

Doutora Ana Paula Duarte Gomes,  
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro. (Orientadora)

Doutor Luís Miguel Cortez Mesquita de Brito,  
Professor Coordenador da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de  
Viana do Castelo.

## **Agradecimentos**

Aos Professores Doutores Ana Paula Duarte Gomes e João António Labrincha Batista pela orientação e disponibilidade.

Aos Pais e Irmão por tudo o que foram, são e representam.

A todos que, directa ou indirectamente, de forma mais ou menos activa, criaram condições ou participaram na realização deste trabalho.

## Palavras-chave

Compostagem, resíduo de aviário, engaço, lama, composto, agregados leves.

## Resumo

É frequente encontrar regiões geográficas onde, os resíduos orgânicos, produzidos, em quantidades apreciáveis, pelas actividades industrial e agro-industrial, poderiam ser geridos de forma integrada, maximizando a valorização e evitando a deposição em aterro.

Na zona da Figueira da Foz, Portugal, as elevadas quantidades de lamas secundárias das ETAR's das fábricas de celulose, de resíduo de aviário, e a produção, sazonal, de engaço constituem, um problema sério de gestão de resíduos para os respectivos produtores. O presente trabalho visa analisar e otimizar a valorização destes resíduos de forma integrada, quer no âmbito das misturas a degradar quer no âmbito da complementaridade das técnicas a utilizar.

Numa primeira fase, recorrendo à compostagem, enquanto técnica, foram processados, em regime de co-compostagem, lamas secundárias de ETAR de celulose e resíduo de aviário, respectivamente, nas proporções de 30:70 e 58:42 (em massa seca), com e sem incorporação de engaço, como agente de porosidade (10% em massa seca), determinadas as misturas mais adequadas à performance do processo e as condições operatórias que conduzem a um maior grau de estabilização do produto final.

Da realização dos ensaios de co-compostagem e da análise dos resultados correspondentes, a 530 h de degradação em condições adequadas de arejamento e humidade, conclui-se essencialmente que: i) a predominância de temperaturas mesófilas ou termófilas não influencia, de modo significativo, o decorrer do processo; ii) as diferentes misturas atingiram graus de estabilização satisfatórios, algo patente, no valor médio, do grau de conversão de sólidos voláteis, 37 %; iii) a incorporação de engaço favoreceu as trocas gasosas durante o processo; iv) o composto final apresenta percentagem de azoto compreendida entre 2,4 e 4,8%. Para cada ensaio, o material estabilizado e maturado, durante um mês, revelou, após realização do teste de vaso, com *Lolium multifolium*, não exercer fitotoxicidade no crescimento de plantas. A análise dos metais Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn revelou níveis inferiores aos que constam na regulamentação em vigor.

Numa segunda fase, enquanto alternativa ou enquanto técnica complementar de valorização de resíduos, foi testada a possibilidade de incorporação de composto (resultante da degradação de resíduo de aviário e de lama de celulose) e de resíduo de aviário, em formulações de agregados leves à base de argila.

Da realização destes ensaios de incorporação de resíduos orgânicos na formulação de agregados leves e da análise dos resultados correspondentes, conclui-se, essencialmente, que: i) os resíduos a incorporar tiveram de ser, previamente, compostados, triturados e peneirados - 250µm. Dos dois métodos de queima testados (queima gradual - 10, 15 e 20°C/min. até à temperatura máxima; queima rápida, até 1180 e 1200°C, com um patamar de 15 minutos), a queima a 1180°C originou melhores resultados. ii) a quantidade de matéria

orgânica incorporada variou entre os 3, 5 e 10% (em peso), mas os melhores resultados corresponderam à incorporação de 3%, para qualquer um dos resíduos. iii) os resultados obtidos revelaram-se satisfatórios, uma vez que, apesar dos elevados valores de absorção de água, os agregados possuem massa específica inferior a  $0.7\text{g/cm}^3$  e resistência à compressão dentro dos limites de mercado. Se considerada a razão entre resistência mecânica e massa específica, algumas das novas formulações apresentam valores superiores aos observados nos agregados leves comerciais.

## Keywords

Composting, poultry litter, stalk, sludge, compost, lightweight aggregates.

## Abstract

It is frequent to find geographic regions where large quantities of organic waste from the industrial and agro-industrial activities might be managed in an integrated way in order to value this waste, avoiding the landfill deposition. In the area of Figueira da Foz, Portugal, high quantities of sludge, from the secondary water treatment of pulp factories, poultry litter and the seasonal production of stalk constitute a serious problem on the waste management to the producers. The present study intends to analyze and optimize the valuing of this waste on an integrated way, either in mixtures to degrade or in the techniques used therefore.

On a first stage using secondary sludge and poultry litter on a co-composting system, in the portion of 30:70 and 58:42 (in dry mass) respectively with or without the incorporation of stalk as agent of porosity (10% in dry mass), the objective is to find out which mixtures were more appropriated to the process' performance and the working conditions that lead to a major degree of stabilization of the final product.

About the co-composting rehearsals and the analysis of the corresponding results, at 530h of degradation in adequate conditions of ventilation and humidity can be concluded that: i) the predominance of mesophilic or thermophilic does not influence in a significant way the flow of the process; ii) the different mixture attained satisfactory degrees of stabilization corresponding to the conversion of volatile solids of 37% (average); iii) the incorporation of stalk favored the gaseous exchanges during the process; iv) the final compost presents nitrogen levels between 2,4 e 4,8%. For each rehearsal, the stabilized and matured material, for one month period, did not exert fitotoxicity on the growth of plants after the vase test with *Lolium multifolium*. Metal analysis to Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn revealed levels lower than to those which set in the regulations.

The second phase of this study tested the incorporation of two organic waste (poultry litter and the compost from the degradation sludge, from the secondary water treatment of pulp factories) as expansive agents of lightweight aggregates of expanded clay usually used in building construction. The objective is to contribute to achieve alternative ways in the massive use of a natural resource, clay.

The rehearsals of incorporating these two organic waste based on clay and the analysis of the corresponding results claim that: i) there are no constraints on the level of preparation of materials and the conditions of burning; ii) the incorporation tested by 3,5 and 10% in mass, 3% will assume the lightweight aggregates with best performance of resistance/lightness and the use of 5 or 10% waste only makes slight changes on the obtained aggregates and reinforces the compositional tolerance in the incorporation of new expansive agents; iii) the aggregates produced with the mixture of clay and compost reveals a higher balance between density, absorption of water and resistance to compression.

### Lista de símbolos e abreviaturas

- $\rho$  – Densidade aparente
- $\varepsilon$  – Rendimento molar
- $\delta/\delta t$  – Derivada em função do tempo
- a,b,c,d – Coeficientes estequiométricos da matéria orgânica
- A2\_45 – Resíduo de aviário, testado a 45°C, no ensaio 2
- AA – Capacidade de absorção de água
- ACO – Argila com óleo
- ASO – Argila sem óleo
- ATD – Análise térmica diferencial
- bs – Base seca
- bssc – Base seca sem cinza
- btq – Base tal qual
- C – Carbono
- Cd – Cádmio
- CEC - capacidade de troca catiónica
- CO – Monóxido de carbono
- CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono
- Comp – Composto resultante da degradação da mistura de lama e resíduo de aviário
- Cr – Crómio
- Cu – Cobre
- d – Diâmetro dos corpos de prova
- DRX – Difractometria de raios X
- E2\_45 – Engaço, testado a 45°C, no ensaio 2
- ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais
- Fracção N-N<sub>Amon</sub> - Fracção mássica de azoto sob a forma de azoto amoniacal
- Fracção N-N<sub>Org</sub> - Fracção mássica de azoto sob a forma de azoto orgânico
- h – Humidade btq
- H<sup>+</sup> – Ião hidrogénio
- HCl – Cloreto de hidrogénio
- HF – Fluoreto de hidrogénio
- I<sub>GC</sub> – Índice de germinação e crescimento
- LA1\_45 – Mistura constituída por lama e resíduo de aviário, testada a 45°C, no ensaio 1
- LA1\_55 – Mistura constituída por lama e resíduo de aviário, testada a 55°C, no ensaio 1
- LA2\_45 – Mistura constituída por lama e resíduo de aviário, testada a 45°C, no ensaio 2
- LAE1\_45 – Mistura constituída por lama, resíduo de aviário e engaço, testada a 45°C, no ensaio 1
- LAE1\_55 – Mistura constituída por lama, resíduo de aviário e engaço, testada a 55°C, no ensaio 1
- LAE2\_45 – Mistura constituída por lama, resíduo de aviário e engaço, testada a 45°C, no ensaio 2



$m$  – Massa dos corpos de prova  
 $M$  – Massa molar  
 Massa  $N-N_{Kj}$  - Massa de azoto determinado como azoto Kjedhal (g)  
 $M_c$  – Massa de material sólido após calcinação na mufla (g)  
 $m_{húmido}$  – Massa dos corpos de prova após secagem na estufa, a 120°C, durante 2 horas e de envolvidos num pano húmido  
 $MO$  – Matéria orgânica  
 $M_s$  – Massa de amostra seca (material sólido após secagem na estufa) (g)  
 $M_{seca}$  – Massa de material sólido existente em cada reactor (g)  
 $m_{seco}$  – Massa dos corpos de prova após secagem na estufa, a 120°C, durante 2 horas  
 $M_{SV}$  – Massa de sólidos voláteis em cada abertura na amostra (g)  
 $M_{SVi}$  – Massa de sólidos voláteis, determinada no instante  $i$ , na amostra (g)  
 $M_{SV0}$  – Massa de sólidos voláteis inicial na amostra(g)  
 $M_{talqual}$  - Massa de material sólido tal qual existente em cada reactor (g)  
 $M_{tq}$  – Massa de amostra de material sólido tal qual (g)  
 $N$  – Azoto  
 $n$  - instante em que se efectua a leitura dos parâmetros  
 $N_{Amon.}$  – Azoto sob a forma de amoníaco  
 $NH_3$  – Amoníaco  
 $Ni$  – Níquel  
 $N_{Kj}$  – Azoto Kjedhal  
 $N_{Org}$  – Azoto orgânico  
 $NO_x$  – Óxidos de azoto  
 $O_2$  – Oxigénio  
 $OH^-$  – Ião hidróxido  
 $P$  – Fósforo  
 $P^1$  – Ruptura por esmagamento  
 $Pb$  – Chumbo  
 $PTN$  – Condições de pressão e temperatura normais  
 $Q_e$  - caudal actual do ar seco de entrada,  $dm^3 PTN/min$   
 $Ravi$  – resíduo de aviário<sup>2</sup>  
 $r_{CO_2}$  – Velocidade da reacção de degradação das misturas e substratos relativamente ao  $CO_2$  produzido (mg/g/h)  
 $RSU$  – Resíduos Sólidos Urbanos

<sup>1</sup> No 2º capítulo deste trabalho (Compostagem),  $P$  representa o elemento químico fósforo. No 3º capítulo do trabalho (Agregados leves),  $P$  representa ruptura por esmagamento.

<sup>2</sup> O resíduo de aviário, no 2º capítulo deste trabalho (Compostagem), é identificado por  $A$ . No 3º capítulo do trabalho (Agregados leves), resíduo de aviário é identificado por  $Ravi$ .

$\text{SO}_x$  – Óxidos de enxofre

SV – Sólidos voláteis

t - tempo de reacção (min);

TG – Análise gravimétrica

v/v – Fracção volumétrica

$V_f$  – Volume do conjunto corpo de prova e areia

$w_{\text{NKj}}$  – Fracção mássica de azoto Kjeldhal, em base tal e qual ((g N)/(g mistura bs))

$w_c$  – Fracção mássica de carbono ((g C)/(g mistura bs))

$w_{\text{SV}}$  – Fracção mássica de sólidos voláteis ((g SV)/(g mistura bs))

$w_{\text{SVi}}$  – Fracção mássica de sólidos voláteis, no instante i ((g SV)/(g mistura bs))

$w_{\text{SV0}}$  – Fracção mássica de sólidos voláteis inicial ((g SV)/(g mistura bs))

$X'_{\text{SVi}}$  – Grau de conversão da massa de sólidos voláteis, determinada em cada abertura, em base de cinza constante (adimensional)

$X_{\text{SVi}}$  – Grau de conversão da massa de sólidos voláteis, determinada por abertura (adimensional)

$y_{\text{CO}_2}$  - fracção molar do  $\text{CO}_2$  no ar seco de exaustão;

Zn – Zinco

$\alpha, \beta, \varphi$  – Coeficientes estequiométricos da reacção

$\alpha_m$  – Resistência á compressão

$\pi$  – Pi

$\gamma$  - Coeficiente de degradação

## Lista de figuras

Figura 2.1: Morfologia de bactérias unicelulares. Fonte: Haug, 1993. ....	7
Figura 2.2: Morfologia de bactérias multicelulares. Fonte Haug, 1993.....	7
Figura 2.3: Absorção de água pelas partículas de um agente estruturante. Fonte: Haug, 1993. ...	14
Figura 2.4: Equipamentos, respectivas acções de funcionamento e circuitos de fluxo gasoso, aquisição de dados e recolha de informações.....	19
Figura 2.5: Reactor; cobertura do reactor em vidro acrílico; fundo do reactor; cesto em malha de aço com asa. ....	20
Figura 2.6: Unidade de medida da fase gasosa (esquerda) e unidade de controlo automático (direita). ....	21
Figura 2.7: Computador. ....	21
Figura 2.8: Termopares e unidade de controlo térmico (direita).....	22
Figura 2.9: Banhos de aquecimento. ....	22
Figura 2.10: Analisador de CO <sub>2</sub> (esquerda) e medidor de fluxo mássico (direita).....	23
Figura 2.11: Digestor (esquerda) e destilador Kjeltex da marca Tecator (direita). ....	24
Figura 2.12: Resíduo de aviário (Esquerda); Engaço (Direita). ....	26
Figura 2.13: Lama secundária de ETAR de celulose. ....	26
Figura 2.14: Descrição das etapas que constituíram os ensaios laboratoriais.....	32
Figura 2.15: Evolução da humidade nas misturas LA1_45, LAE1_45, LA1_55 e LAE1_55. ....	36
Figura 2.16: Evolução da humidade nas misturas LA2_45, LAE2_45, no resíduo de aviário, A2_45, e no engaço, E2_45. ....	37
Figura 2.17: Evolução da massa seca nas misturas LA1_45, LAE1_45, LA1_55 e LAE1_55.....	38
Figura 2.18: Evolução da massa seca nas misturas LA2_45, LAE2_45, no resíduo de aviário, A2_45, e no engaço, E2_45.....	39
Figura 2.19: Evolução dos sólidos voláteis nas misturas LA1_45, LAE1_45, LA1_55 e LAE1_55. ....	40
Figura 2.20: Evolução dos sólidos voláteis nas misturas LA2_45, LAE2_45, no resíduo de aviário, A2_45, e no engaço, E2_45.....	41
Figura 2.21: Evolução do grau de conversão das misturas LA1_45, LAE1_45, LA1_55 e LAE1_55. ....	42
Figura 2.22: Grau de conversão da massa de SV vs Grau de conversão de SV na base cinza constante, por abertura, durante o ensaio 1. ....	44

Figura 2.23: Evolução do grau de conversão nas misturas LA2_45, LAE2_45, no resíduo de aviário, A2_45, e no engaço, E2_45. ....	45
Figura 2.24: Grau de conversão da massa de SV vs Grau de conversão de SV na base cinza constante, por abertura, durante o ensaio 2. ....	46
Figura 2.25: Evolução do pH nas misturas LA1_45, LAE1_45, LA1_55 e LAE1_55. ....	47
Figura 2.26: Evolução do pH nas misturas LA2_45, LAE2_45, no resíduo de aviário, A2_45, e no engaço, E2_45. ....	48
Figura 2.27: Volume recolhido e o carácter químico da purga produzida nas misturas LA1_45 e LAE1_45.....	49
Figura 2.28: Volume recolhido e o carácter químico da purga produzida nas misturas LA1_55 e LAE1_55.....	49
Figura 2.29: Volume recolhido e o carácter químico da purga produzida nas misturas LA2_45 e LAE2_45.....	50
Figura 2.30: Volume recolhido e o carácter químico da purga produzida no resíduo de aviário, A2_45, e no engaço, E2_45. ....	51
Figura 2.31: Teor de CO <sub>2</sub> libertado pelas misturas LA1_45, LAE1_45, LA1_55 e LAE1_55 em comparação com caudal de ar fixo e teoricamente estabelecido para satisfazer as necessidades de ar estequiométrico da reacção. ....	52
Figura 2.32: Teor de CO <sub>2</sub> libertado pelas misturas LA2_45, LAE2_45, pelo resíduo de aviário, A2_45, e pelo engaço, E2_45, em comparação com caudal de ar fixo e teoricamente estabelecido para satisfazer as necessidades de ar estequiométrico da reacção. ....	53
Figura 2.33: Teor de CO <sub>2</sub> libertado pelas misturas LA1_45, LAE1_45, LA1_55 e LAE1_55 em comparação com caudal de ar efectivamente fornecido para satisfazer as necessidades de ar estequiométrico da reacção. ....	54
Figura 2.34: Teor de CO <sub>2</sub> libertado pelas misturas LA2_45, LAE2_45, pelo resíduo de aviário, A2_45, e pelo engaço, E2_45, em comparação com caudal de ar efectivamente fornecido para satisfazer as necessidades de ar estequiométrico da reacção.....	55
Figura 2.35: Volume de CO <sub>2</sub> acumulado durante a reacção das misturas LA1_45, LAE1_45, LA1_55 e LAE1_55. ....	57
Figura 2.36: Volume de CO <sub>2</sub> acumulado durante a reacção das misturas LA2_45, LAE2_45, do resíduo de aviário, A2_45, e do engaço, E2_45. ....	58
Figura 2.37: Relação entre a massa de sólidos voláteis gaseificados e o volume de CO <sub>2</sub> libertado pelas misturas LA1_45, LAE1_45, LA1_55 e LAE1_55.....	61

Figura 2.38: Relação entre a massa de sólidos voláteis gaseificados e o volume de CO <sub>2</sub> libertado pelas misturas LA2_45, LAE2_45, pelo resíduo de aviário, A2_45, e pelo engaço, E2_45. ....	63
Figura 2.39: Comparação entre o volume de CO <sub>2</sub> acumulado e a velocidade de degradação das misturas e dos substratos em estudo, nos ensaios 1 e 2. ....	65
Figura 2.40: Volume de CO <sub>2</sub> acumulado pelas misturas e substratos em estudo, nos ensaios 1 e 2. ....	66
Figura 2.41: Grau de conversão total das misturas vs CO <sub>2</sub> acumulado nas misturas e substratos em estudo, nos ensaios 1 e 2. ....	67
Figura 2.42: A presença, nas diferentes formas, do azoto no composto resultante da decomposição das misturas LA1_45, LAE1_45, LA1_55 e LAE1_55. ....	69
Figura 2.43: A presença, nas diferentes formas, do azoto no composto resultante da decomposição das misturas LA2_45, LAE2_45, do resíduo de aviário, A2_45, e do engaço, E2_45. ....	70
Figura 2.44: Teste de vaso referente ao branco e às misturas LA2_45 e LAE2_45, em estudo no ensaio 2. ....	76
Figura 3.1: Curvas correspondentes à análise térmica diferencial (ATD) e à análise térmica gravimétrica (TG). ....	92
Figura 3.2: Curvas correspondentes à análise térmica diferencial (ATD) e à análise térmica gravimétrica (TG). ....	92
Figura 3.3: Fissura observada nos agregados leves após cozedura. ....	93
Figura 3.4: Aspecto exterior do agregado padrão ACO. ....	94
Figura 3.5: Aspecto interno do agregado ACO – visualização do coração negro e da estrutura porosa. ....	94
Figura 3.6: Aspecto interno do agregado ACO+Comp – coração negro e estrutura porosa. ....	95
Figura 3.7: Relação entre a densidade e a absorção de água (AA) para os agregados leves em estudo (ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp). ....	97
Figura 3.8: Relação entre a densidade e a resistência à compressão para os agregados leves em estudo (ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp). ....	98
Figura 3.9: Relação entre a resistência à compressão e a densidade para os agregados leves em estudo (ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp). ....	99

## Lista de tabelas

Tabela 2.1: Parâmetros físico-químicos analisados, métodos, equipamentos utilizados e condições de operação.....	25
Tabela 2.2: Valores médios apurados nas análises efectuadas aos parâmetros físico-químicos na caracterização de resíduos. ....	28
Tabela 2.3: Coeficiente de variação associado à determinação dos parâmetros físico-químicos na caracterização dos resíduos. ....	28
Tabela 2.4: Análise elementar da fracção orgânica da lama e do resíduo de aviário (efectuada em laboratório externo) .....	29
Tabela 2.5: Designação, composição e condições de degradação das misturas em análise no ensaio 1. ....	30
Tabela 2.6: Designação, composição e condições de degradação das misturas em análise no ensaio 2. ....	31
Tabela 2.7: Parâmetros físico-químicos analisados nas diferentes fases em estudo. ....	32
Tabela 2.8: Cálculo dos coeficientes da fórmula empírica da matéria orgânica do resíduo de aviário. ....	59
Tabela 2.9: Cálculo dos coeficientes da fórmula empírica da matéria orgânica da lama.....	59
Tabela 2.10: Cálculo dos coeficientes da fórmula empírica da matéria orgânica da mistura 1.....	60
Tabela 2.11: Cálculo dos coeficientes da fórmula empírica da matéria orgânica na mistura 2.....	62
Tabela 2.12: A presença do azoto nas misturas e nos substratos em estudo no início do ensaio 1 e do ensaio 2. ....	68
Tabela 2.13: A presença do azoto nas misturas e nos substratos em estudo no final do ensaio 1 e do ensaio 2. ....	68
Tabela 2.14: Concentração dos elementos metálicos em mg/kg, base seca. (ND - não detectável, LQ - limite quantificável). ....	72
Tabela 2.15: Valores máximos admissíveis para os teores “totais” de metais pesados em mg/kg de matéria seca. ....	72
Tabela 2.16: Valores estimados da fracção de carbono no composto e valores calculados da razão carbono/azoto.....	74
Tabela 2.17: Crescimento de azevém em substrato sem composto (Branco) e com a adição composto LA1_45, LA1_55 e LAE1_45, em diferentes proporções. ....	75

Tabela 2.18: Crescimento de azevém em substrato sem composto (Branco) e com a adição de composto LAE1_55, LA2_45 e LAE2_45, em diferentes proporções. ....	75
Tabela 3.1: Composição das misturas em estudo (ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp). ....	89
Tabela 3.2: Caracterização quanto aos parâmetros pH, humidade e sólidos voláteis do resíduo de aviário e do composto. ....	91
Tabela 3.3: Densidade aparente dos agregados produzidos á custa das misturas ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp. ....	95
Tabela 3.4: Relação matemática e proporcionalidade entre as densidades aparentes dos agregados ASO+Ravi, ASO+Comp e o agregado padrão (ACO). ....	96
Tabela 3.5: Absorção de água dos agregados produzidos á custa das misturas ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp. ....	96
Tabela 3.6: Resistência à compressão dos agregados ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp.....	97
Tabela 3.7: Comparação entre a resistência mecânica e a densidade aparente para cada um dos agregados em estudo (ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp). ....	98

**Índice de conteúdos**

<b>1. Introdução geral.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Compostagem.....</b>	<b>5</b>
2.1. Introdução.....	5
2.1.1. Perspectiva histórica .....	5
2.1.2. Descrição do processo .....	6
2.1.3. Parâmetros físico-químicos .....	9
2.1.3.1. Humidade .....	9
2.1.3.2. Temperatura .....	10
2.1.3.3. Oxigénio/Arejamento .....	11
2.1.3.4. Relação carbono/azoto.....	12
2.1.3.5. Granulometria .....	13
2.1.3.6. pH .....	15
2.1.4. Qualidade do composto.....	16
2.2. Materiais e métodos .....	18
2.2.1. Montagem laboratorial.....	19
2.2.2. Métodos de caracterização .....	24
2.2.3. Recolha acondicionamento e preparação dos resíduos .....	25
2.2.4. Caracterização dos resíduos.....	27
2.2.5. Metodologia .....	29
2.2.5.1. Preparação das misturas.....	29
2.2.5.2. Monitorização .....	31
2.2.5.3. Procedimento experimental.....	33
2.3. Resultados e discussão.....	34
2.3.1. Humidade .....	35
2.3.2. Massa Seca .....	37
2.3.3. Sólidos Voláteis .....	39
2.3.4. Grau de conversão .....	42
2.3.5. pH .....	46
2.3.6. Características da purga .....	48
2.3.7. Teor de CO <sub>2</sub> nos gases de compostagem .....	51
2.3.8. CO <sub>2</sub> gerado e acumulado .....	56



2.3.9. Estequiometria.....	58
2.3.10. Velocidade da reacção.....	63
2.3.11. Balanço do azoto.....	67
2.3.12. Avaliação da qualidade do composto.....	71
2.4. Conclusões.....	76
<b>Referências .....</b>	<b>79</b>
<b>3. Agregados leves .....</b>	<b>83</b>
3.1. Introdução.....	83
3.1.1. Definições e propriedades.....	83
3.1.2. Processo de produção de agregados leves.....	84
3.1.3. Fenómeno de Expansão .....	84
3.1.4. Matérias-primas alternativas/Testes de incorporação de resíduos .....	87
3.2. Procedimento experimental.....	89
3.3. Resultados e discussão .....	91
3.3.1. Caracterização de materiais.....	91
3.3.2. Morfologia dos agregados .....	93
3.3.3. Características físicas e mecânicas .....	95
3.4. Conclusões.....	100
<b>Referências .....</b>	<b>101</b>
<b>4. Conclusões gerais.....</b>	<b>103</b>

## 1. Introdução geral

Actualmente a concretização das políticas de desenvolvimento e crescimento das sociedades não se esgota apenas na aplicação de medidas económicas. Cada vez mais, o crescimento e desenvolvimento das sociedades modernas assenta no equilíbrio entre questões económicas, de protecção e valorização do meio ambiente, propiciando, às populações, uma crescente qualidade de vida.

Neste contexto, sabendo de antemão que os recursos naturais são finitos, a valorização de algumas fileiras de resíduos surge como uma opção de futuro na gestão dos recursos naturais. Em casos particulares, a valorização das fileiras de resíduos permite restituir ao ambiente um conjunto de elementos químicos essenciais para o desenvolvimento equilibrado da flora, da fauna e, por consequência, da actividade humana.

A reciclagem e a valorização dos resíduos são também um vector de desenvolvimento económico e financeiro. As mais-valias destes processos estão associadas à inovação, à criação de emprego, ao prolongamento da vida útil dos produtos e à eficiência dos processos produtivos.

Sem esquecer o enorme salto qualitativo e quantitativo, no curto período de duas décadas, no que concerne o encerramento de lixeiras, a abertura de aterros, a aplicação de métodos de recolha, de separação, de tratamento e de valorização de algumas fileiras de resíduos e constatando também a evolução da consciência e das boas práticas ambientais, são ainda evidentes, em Portugal, lacunas relacionadas com a recolha selectiva e consequente valorização da fracção orgânica dos resíduos urbanos e industriais.

O presente trabalho apresenta um estudo direccionado a resíduos biodegradáveis produzidos na zona da Figueira da Foz.

As elevadas quantidades de resíduo de aviário, de lamas secundárias das Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETARs) das fábricas de celulose e a produção sazonal de engaço constituem, no momento, um problema sério de gestão de resíduos para os respectivos produtores.

As soluções encontradas para resolver este problema têm sido, até à data, a deposição em aterro e a deposição directa nos terrenos agrícolas limítrofes das instalações produtoras.

A criação intensiva de aves (frangos) gera grandes quantidades de resíduo agropecuário, vulgarmente designado por cama de aviário. A cama de aviário é constituída por dejectos, restos de ração e material absorvente, de origem agrícola ou florestal.

De acordo com a legislação, nomeadamente com o Decreto-Lei n.º 178/2006 que estabelece o regime geral da gestão de resíduos e transpõe para a ordem jurídica nacional a Directiva nº 2006/12/CE, trata-se de um resíduo agrícola, uma vez que, «Resíduo Agrícola» o resíduo proveniente de exploração agrícola e ou pecuária ou similar.

As orientações fundamentais para a gestão dos resíduos agrícolas encontram-se no Plano Estratégico de Resíduos Agrícolas (PERAGRI) e consideram estes resíduos sob uma dupla vertente, a do produtor e a do destinatário (APA, 2010).

O Decreto-Lei n.º 178/2006 exclui do âmbito da sua aplicação “iii) Cadáveres de animais, ou suas partes, e resíduos agrícolas que sejam chorume e conteúdo do aparelho digestivo ou outras substâncias naturais não perigosas aproveitadas nas explorações agrícolas”. Portanto, caso não existam alternativas de aproveitamento/valorização em explorações agrícolas, a cama de aviário está enquadrada no âmbito do Decreto-Lei n.º 178/2006.

As águas residuais da indústria de pasta para papel, provenientes do tratamento em ETAR, originam um efluente líquido (lançado ao mar) e um resíduo sólido - lama - que, caso não seja valorizado, tem como destino final a deposição em aterro.

Em Portugal, na última década, o destino privilegiado destas lamas é efectivamente a deposição em aterro (60%). Cerca de 30% dessas lamas são reutilizadas na agricultura e 10% têm destino desconhecido (Carteiro, 2002).

As recomendações Europeias, para a correcta gestão das lamas de ETARs, apontam para a deposição em aterro, apenas quando outros destinos/soluções não sejam técnica ou economicamente viáveis, e ainda, para a necessidade de privilegiar soluções de valorização agrícola, com vista ao aproveitamento da matéria orgânica e dos nutrientes.

O Decreto-Lei nº 276/2009 regula “...a utilização agrícola das lamas de depuração, congregando dois objectivos ambientais primordiais, a credibilização das operações de valorização de resíduos e a protecção do ambiente e da saúde pública.”, e estabelece o regime de utilização de lamas de depuração em solos agrícolas, “...dispõe sobre requisitos de qualidade para as lamas e para os solos, verificáveis através da

conformidade das análises requeridas com os valores limite estabelecidos, define ainda um conjunto de restrições à utilização das lamas no solo, prevê procedimentos específicos de aplicação das lamas, bem como deveres de registo e informação por parte dos operadores de gestão de lamas.”

As lamas provenientes do tratamento de efluentes da produção e transformação da pasta para papel, papel e cartão, nos termos da classificação da LER 030311, são entendidas como *lamas de composição similar*, pelo que se encontram abrangidas no âmbito do Decreto-Lei n.º 276/2009.

No contexto da aplicação de resíduos biodegradáveis no solo, de referir ainda, enquanto complemento legislativo, o Programa de Acção para as Zonas Vulneráveis de Portugal Continental, aprovado na Portaria nº 83/2010, que “...tem como objectivo reduzir a poluição das águas causada ou induzida por nitratos de origem agrícola...”.

A valorização dos resíduos biodegradáveis é fundamental, sob ponto de vista da sustentabilidade ambiental, visto poder assumir um papel relevante no desvio da matéria orgânica não estabilizada enviada, actualmente, para aterro. Desta forma, a valorização de resíduos biodegradáveis contribuirá, decisivamente, para o cumprimento do Decreto-Lei nº 183/2009, que estabelece o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e restringe, num futuro próximo, a deposição de matéria orgânica biodegradável em aterro.

As alterações dos hábitos e dos comportamentos sociais com repercussões no ambiente têm origens diversas. No entanto, mesmo que indirectamente, as Directivas Europeias, depois de transpostas para o direito nacional, constituem instrumentos importantes na criação de condições, no estabelecimento de regras, na promoção da criatividade e no desenvolvimento de acções destinadas à protecção e valorização do meio ambiente.

Não obstante os resíduos de aviário, as lamas ETARs das fábricas de celulose e o engaço, serem alvo de valorização orgânica através da aplicação directa no solo, esta solução nem sempre está ao alcance dos produtores. A intensiva e contínua produção de alguns destes resíduos, numa zona geográfica de dimensão tão reduzida como um concelho, excede a capacidade da actividade agrícola regional para absorver esses materiais.

A deposição intensiva destes resíduos no solo, acarreta, ainda, problemas ambientais e de saúde pública, nomeadamente os que se relacionam com a libertação de odores, a formação de escorrências superficiais e de lixiviados, estes últimos,

mobilizadores de contaminantes e de produtos intermédios da decomposição da matéria orgânica, potencialmente causadores de poluição nas linhas de água superficiais e subterrâneas.

Neste contexto surge a necessidade ambiental de encontrar alternativas de valorização - estabilização da matéria orgânica biodegradável – e a oportunidade económica de criar um produto para o mercado nacional, o que, entre outras vantagens, permitirá a reutilização destes resíduos numa escala significativamente superior à regional.

Para os resíduos considerados, este trabalho tem como objectivo analisar e optimizar a valorização orgânica e material, através da produção de composto e de agregados leves, respectivamente.

Inicialmente, recorrendo à compostagem, pretende determinar-se a razão de mistura mais adequada, para os três tipos de resíduos, e em que condições operacionais se obtém melhor grau de estabilização.

Posteriormente, e tendo em consideração as características dos resíduos, das misturas e dos compostos obtidos, após a degradação, será testada a possibilidade de utilização destes materiais na concepção de agregados leves.

## 2. Compostagem

Embora de um modo geral, a literatura da especialidade revele a necessidade de ultrapassar determinadas adversidades relacionadas com as características dos resíduos, humidade e estrutura física pouco adequadas ou até o desequilíbrio de nutrientes, o processo de compostagem tem sido aplicado com sucesso na estabilização dos resíduos de aviário (Hanse *et al*, 1993; Tiquia & Tam, 2002; Sanches, 2007) e na estabilização de lamas de ETARs das fábricas de celulose (Marche, T. *et al*, 2003),

Para superar estes problemas operacionais recorre-se, frequentemente, ao processamento de resíduos em regime de co-compostagem. Desta forma, tendo em conta, as sinergias que se estabelecem, obtêm-se vantagens ao nível do processo e da qualidade do produto final (Lemos *et al*., 2009; Leconte *et al*., 2009; Gomes *et al*., 2009).

O presente capítulo procura descrever o processo de compostagem, nos seus fundamentos e a sua aplicação ao nível laboratorial. Nesse sentido é apresentada a caracterização dos resíduos, descrita a montagem experimental e a metodologia, referidos os métodos de análise, apresentados os resultados obtidos e as conclusões específicas.

### 2.1. Introdução

As secções que se seguem, têm o propósito de descrever o processo de compostagem e co-compostagem, relativamente aos seus fundamentos, condições de operação e às proporções dos resíduos em misturas para co-compostagem.

#### 2.1.1. Perspectiva histórica

Perdem-se no tempo as referências à compostagem. A fertilização das terras de cultivo recorrendo à adição de dejectos de animais, era uma técnica que, já em 1000 a.C, era usada pelas populações Assírias, na antiga Mesopotâmia<sup>3</sup>.

Os Romanos, tal como os Gregos e as tribos de Israel evidenciavam conhecimentos relacionados com o composto<sup>3</sup>. Estes dois últimos povos apresentavam, inclusivamente, um vocábulo específico para composto<sup>4</sup>.

Obras como a Bíblia ou o Talamude apontam o uso de dejectos de animais e de palha podre, enquanto que os Árabes, durante os séculos X e XII, a Igreja, em textos

---

<sup>3</sup> <http://web.extension.uiuc.edu/homecompost/history.html>, consult. 7 Maio 2009

<sup>4</sup> <http://www.saskwastereduction.ca/resources/Composting/history.html>, consult. 7 Maio 2009

medievais, e os documentos Renascentistas referenciam a utilização de um composto orgânico na agricultura<sup>3,4</sup>.

No século XIX, a excepcional fertilidade das terras de cultivo chinesas era descrita e associada ao comportamento dos agricultores. A cada viagem de ida à cidade onde se deslocavam para venderem produtos agrícolas, correspondia um regresso a casa com um carregamento de dejectos produzidos na cidade que, posteriormente, seria aplicado como fertilizante (Haug, 1993).

Publicações do início do século XX identificam nos agricultores chineses, coreanos e japoneses amplas práticas de compostagem<sup>3</sup>.

As práticas europeias de não reutilização, nas terras de cultivo, dos dejectos produzidos nas grandes cidades constituíam, para alguns, uma oportunidade de ouro perdida para restituir à terra os nutrientes que, ininterruptamente, lhe eram retirados. Sir Albert Howard, um agronomista do Império Britânico, desenvolveu os princípios que inspiraram a compostagem dos nossos dias. Sir Howard considerava que um solo fértil deveria conter elevados índices de húmus, por forma a permitir o crescimento de plantas saudáveis (Haug, 1993).

As sociedades actuais geram imensas quantidades de resíduos orgânicos, passíveis de serem restituídos, à terra sob a forma de nutrientes, mas enviados, em regra, para aterro. A compostagem pode constituir uma peça importante do puzzle que é a gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e dos resíduos industriais produzidos por alguns sectores de actividade.

### **2.1.2. Descrição do processo**

Apesar de ser um fenómeno que, desde sempre e frequentemente ocorre na natureza, não existe uma definição uniforme, genericamente, aceite para compostagem (Matos & Pereira, 2004) e (Haug, 1993).

Compostagem poder-se-á considerar um processo biológico de decomposição e estabilização de substratos orgânicos, por via aeróbia, em condições termófilas de temperatura (40 a 60°C), proporcionado pela actividade dos microrganismos, de onde resulta um produto final estável, livre de agentes patogénicos, de sementes de plantas e ervas daninhas, cuja aplicação é benéfica para o solo (Haug, 1993).

Os substratos orgânicos, ricos em nutrientes são colonizados por microrganismos que, com o auxílio do oxigénio (O<sub>2</sub>), desencadeiam nesses substratos um conjunto de

reações mecânicas, biológicas e químicas, nomeadamente reações de oxidação-redução, com vista à degradação dessa matéria orgânica e à libertação da energia necessária à sua sobrevivência (Matos & Pereira, 2004) e (Gonçalves, 2005).

Este processo de degradação envolve diferentes populações de microrganismos que competem entre si e se segregam, dominando, sequencialmente, as diferentes etapas do processo, consoante as características nutricionais do substrato e as condições ambientais envolventes (Golueke, 1997) e (Gonçalves, 2005).

A figura 2.1 ilustra a morfologia de algumas bactérias unicelulares que intervêm nas reações de degradação dos substratos

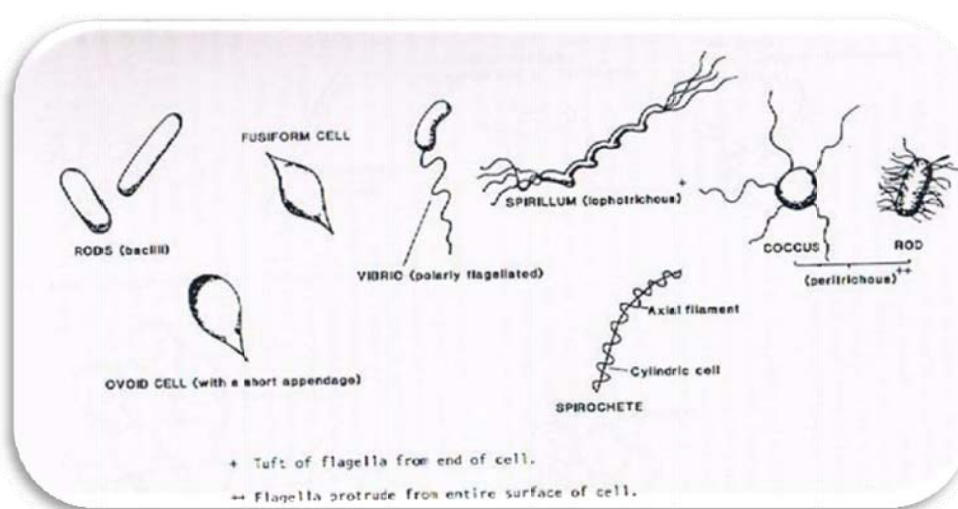


Figura 2.1: Morfologia de bactérias unicelulares. Fonte: Haug, 1993.

A figura 2.2 ilustra a morfologia de algumas bactérias multicelulares que intervêm nas reações de degradação dos substratos.

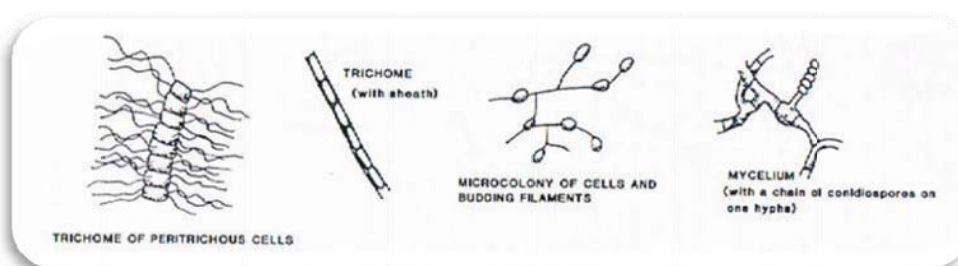


Figura 2.2: Morfologia de bactérias multicelulares. Fonte Haug, 1993.

Durante a compostagem sucedem-se três fases distintas, a fase hidrolítica, a fase termófila e a fase de maturação. A fase hidrolítica é a primeira das três fases que constituem o processo de compostagem. Decorrida a colonização dos substratos a



degradar, na presença de  $O_2$ , durante os três dias iniciais, assiste-se ao aumento da actividade e do crescimento das bactérias mesófilas que promovem a decomposição, relativamente rápida, de alguns compostos do substrato, mais facilmente biodegradáveis. A acção destas bactérias transforma as proteínas, os lípidos e os glúcidos hidrolisáveis, compostos cujas moléculas apresentam estrutura mais longa e complexa, em compostos de estrutura de cadeia mais curta e simples, como sejam, respectivamente, os aminoácidos, os açúcares e os ácidos gordos voláteis solúveis. Desta acção bacteriológica resulta, ainda, a elevação da temperatura do substrato, até cerca de  $40^{\circ}C$  e a formação de água ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), e amoníaco ( $NH_3$ ). Estes dois últimos compostos são responsáveis pela alteração do pH e pela presença de azoto que permitirá a formação de novas células (Matos & Pereira, 2004), (Gonçalves, 2005) e (Gomes, 2006).

A fase termófila, dependendo da temperatura a que se encontra o substrato, poderá durar alguns dias ou semanas. Nesta fase desenvolvem-se fenómenos intensos de crescimento biológico e de metabolismo dos microrganismos. Em consequência, assiste-se à assimilação dos compostos solubilizados e transformados na fase anterior, à produção de  $CO_2$ , de  $H_2O$ , à reconversão de diversos nutrientes, nomeadamente do N, e à libertação de energia, sob a forma de calor. Durante esse período, a temperatura do substrato pode atingir os  $70^{\circ}C$ . Desenrolam-se nesta fase as maiores mudanças na composição do substrato e a substituição da população mesófila, que sucumbe à medida que a temperatura e o pH aumentam, dando lugar a bactérias termófilas, a fungos e actinomicetas, cuja actividade se mantém, em meio alcalino (Gomes, 2006) e (Matos & Pereira, 2004).

A fase de maturação pode durar vários meses e corresponde à fase de degradação dos compostos, presentes no substrato, que apresentam menor biodegradabilidade. Da celulose à lenhina, passando pela hemicelulose, todos os compostos menos biodegradáveis vão ser decompostos, em maior ou menor extensão, pela acção das diferentes populações de microrganismos, referenciadas anteriormente. A energia libertada para o exterior do substrato, sob a forma de calor, excede a energia produzida, na fase termófila, pela actividade dessas populações. Consequentemente, verifica-se uma diminuição da temperatura do substrato em degradação e uma nova substituição das populações de microrganismos (Matos & Pereira, 2004).

Nesta fase são as populações termófilas (fungos e actinomicetas) que sucumbem às populações mesófilas (bactérias). A nova invasão do meio por estas populações de

microrganismos ocorre agora de forma inversa, permitindo que as reacções de degradação se completem (Gomes, 2006).

Tal como anteriormente referido, todos os processos biológicos que tornam possível a degradação da matéria orgânica de origem -o substrato- num produto final estabilizado -o composto- ocorrem livremente na natureza e são condicionados por factores ambientais envolventes, como a temperatura, a humidade e o fornecimento de ar.

Contudo, nos dias que correm, os sucessivos avanços científicos e tecnológicos permitem conhecer detalhadamente as etapas da compostagem, construir e utilizar equipamentos que proporcionam as condições físicas e químicas óptimas para que, no menor período possível, se obtenha o composto.

Neste contexto de conhecimento científico e tecnológico, que visa a eficiência de todo este processo, importa dominar essencialmente os parâmetros humidade, temperatura, fornecimento de ar, razão C/N, granulometria e pH (Matos & Pereira, 2004)

### **2.1.3. Parâmetros físico-químicos**

#### **2.1.3.1. Humidade**

No que se refere à humidade, de maneira a mantê-la em níveis que promovam a degradação dos resíduos a compostar, há a considerar a natureza e a estrutura dos mesmos. Dependendo da sua estrutura, os resíduos estruturalmente mais fortes não absorvem tanto a água como os resíduos estruturalmente mais fracos. Os resíduos estruturalmente mais fracos, quando regados, absorvem maiores volumes de água podendo formar, com maior facilidade, um substrato algo compactado (empapado) que impossibilita a circulação de ar. Neste cenário, as zonas de degradação anaeróbia resultantes originam inactivação microbiana e a formação de odores desagradáveis (Gonçalves, 2005) e (Gómez *et al.* 2006).

As necessidades de água variam durante o processo de compostagem e são mais significativas na fase termófila. Nesta fase, a presença de água é fundamental para proporcionar condições que permitam aos microrganismos desempenhar uma actividade intensa de degradação e reconversão da matéria orgânica. Trata-se de um equilíbrio sensível, uma vez que, se o substrato estiver demasiado seco, há um decréscimo do crescimento e da actividade microbiana, mas se o substrato estiver demasiado húmido, há uma redução na transferência de oxigénio para os microrganismos. Em alguns casos de excesso de humidade, os espaços vazios, entre os constituintes do substrato, podem

constituir caminhos para a água reduzindo, ainda mais, a transferência de oxigénio para esses microrganismos (Gonçalves, 2005) e (Fletcher *et al.*, 2000).

Quando a humidade é inferior a 50% ocorre um declínio significativo da actividade microbiana e, em consequência, uma diminuição da taxa de degradação dos resíduos. Essa actividade microbiana torna-se residual se a humidade do substrato atingir valores inferiores a 20%. A actividade microbiana e a taxa de degradação de resíduos atingem valores máximos quando a humidade do substrato se encontra entre os 50 e os 70% (Fletcher *et al.*, 2000).

#### **2.1.3.2. Temperatura**

Em relação ao parâmetro temperatura, deve ter-se em conta que, todos os microrganismos presentes neste processo actuam com maior ou menor eficiência de acordo com a temperatura a que se encontra o substrato. A temperatura condiciona as funções bioquímicas desses organismos e, por consequência a velocidade das reacções químicas de degradação, por eles promovidas (Haug, 1993).

Sempre que os substratos estão sujeitos a baixas temperaturas ocorre uma diminuição da velocidade das reacções químicas, logo, também, das respectivas taxas de degradação. Nestas condições, devido à reduzida actividade biológica dos microrganismos, a energia gerada pelas reacções de degradação é inferior à energia libertada por condução ou convecção, para o meio envolvente. Num cenário de temperaturas baixas ou muito baixas, rondando os 0°C, torna-se particularmente difícil promover a ignição de todo o processo, pelo que será desejável, tão rapidamente quanto possível, conservar a energia dos resíduos, algo que pode ser conseguido com o correcto armazenamento ou aquecimento inicial dos mesmos (Haug, 1993).

A velocidade das reacções de degradação tende a aumentar exponencialmente com a subida da temperatura e é expectável que, em resíduos com populações diversificadas de microrganismos, ocorram, com naturalidade, transições entre populações mesófilas e termófilas. Refira-se que, há limites para este crescimento exponencial das populações microbianas com a temperatura. Aos sucessivos acréscimos de temperatura não correspondem, directamente, aumentos da taxa de degradação. Temperaturas elevadas provocam às populações termófilas, muito resistentes, problemas praticamente intransponíveis, no que concerne a degradação de enzimas, provocando também a diminuição das taxas de degradação (Haug, 1993).

As taxas de degradação consideradas ótimas correspondem a temperaturas compreendidas entre os 40°C e os 60°C. Com temperaturas superiores a 60°C, assiste-se ao início da inactivação de fungos e actinomicetos. Atingidos os 80°C, também as bactérias se tornam inactivas (Fletcher *et al.*, 2000) e (Haug, 1993).

O arrefecimento é determinante e consegue-se aumentando o arejamento ou o número de revolvimentos do substrato. Desta forma, é libertada, para o meio envolvente, por convecção, a energia em excesso no sistema (Fletcher *et al.*, 2000) & (Haug, 1993).

Com vista à aceleração do processo e à destruição de microrganismos patogénicos, durante a compostagem devem ser criadas condições para que sejam atingidas temperaturas da gama termófila.

#### **2.1.3.3. Oxigénio/Arejamento**

O fornecimento de ar, por via natural ou artificial (arejamento), condiciona o processo de compostagem, visto que permite a remoção da energia e da humidade, em excesso, e garante as necessidades de O<sub>2</sub>, viabilizando, assim, as reacções de decomposição executadas, pelos microrganismos aeróbios presentes, nos resíduos a compostar (Haug, 1993).

A necessidade de fornecimento de ar para reduzir e controlar a humidade e a temperatura do substrato é, genericamente, superior às necessidades de O<sub>2</sub> para manter a estequiometria das reacções de oxidação que ocorrem durante a degradação (Haug, 1993). O volume de ar fornecido ao processo depende da natureza e das condições em que se encontra o substrato e deverá reflectir a importância relativa, em cada situação particular, das necessidades de O<sub>2</sub>, da remoção de energia e de humidade (Fletcher *et al.*, 2000). A necessidade de ar para reduzir os elevados valores de humidade presentes em alguns substratos tende a sobrepor-se à necessidade de ar para reduzir a temperatura e as necessidades estequiométricas (Haug, 1993).

Em substratos mais secos, a necessidade de ar para reduzir a temperatura dos substratos sobrepõe-se à necessidade de ar para controlar e garantir respectivamente a humidade e estequiometria das reacções de degradação dos mesmos. Apenas com substratos relativamente secos, com humidade inferior a 50% e que registem temperaturas elevadas no ar expelido, as necessidades de ar estequiométrico e de secagem são semelhantes (Haug, 1993).

Se o fornecimento de ar, ao substrato a degradar, proporcionar uma concentração de O<sub>2</sub> superior a 10%, estão reunidas as condições para que todo o processo decorra de

forma aeróbia, garantindo a actividade microbiana e evitando a formação de odores desagradáveis (Gonçalves, 2005).

Se a concentração  $O_2$  estiver delimitada entre 5 e 10%, a actividade microbiana abrandará e em situações cuja concentração de  $O_2$  seja inferior a 5%, as necessidades de oxigénio dos microrganismos não são satisfeitas, logo, verifica-se, não só, uma diminuição da actividade microbiana, como também da própria população e assiste-se à formação de zonas anaeróbias (Gonçalves, 2005) e (Brito, 2003).

A ausência de  $O_2$  provoca uma oxidação incompleta de alguns compostos, tais como ácidos gordos voláteis de baixo peso molecular (acético, propiónico, butírico), compostos de enxofre (ácido sulfídrico), compostos aromáticos e aminas, que se libertam para o exterior e originam odores desagradáveis (Brito, 2003).

De forma a evitar as consequências da ausência, mais ou menos acentuada, do  $O_2$  o substrato deve ser revolvido periodicamente ou deverão ser adoptadas estratégias de arejamento forçado, uma vez que o arejamento por convecção natural (transporte de massa) é relativamente lento e nem sempre eficaz, visto estar dependente do espaço intersticial e da humidade do substrato (Fletcher *et al.*, 2000) e (Gonçalves, 2005).

#### **2.1.3.4. Relação carbono/azoto**

A relação C/N varia durante as diferentes fases do processo de compostagem, está dependente da natureza dos substratos e é essencial para o crescimento e actividade das populações microbianas que suportam este processo de degradação. C e N são elementos que constituem, em proporções distintas (50%C; 5%N), as células dos microrganismos. Quando assimilado, o C é essencialmente usado nas funções vitais, enquanto o N é imprescindível para a formação de novas células (Gonçalves, 2005).

Encontrando-se o N, dos substratos, maioritariamente disponível na forma orgânica, é desejável que, também o C, presente nesses substratos, esteja disponível para ser utilizado pelos microrganismos, caso contrário, é inviabilizada a utilização do N que acaba por se perder via  $NH_3(g)$  ou  $NH_3(aq)$ , por lixiviação (Santos, 1997) e (Brito, 2003).

Na fase inicial de degradação do substrato, considera-se ideal a relação C/N entre 30 e 35, uma vez que se verifica uma elevada degradação do substrato. Abaixo deste intervalo a rápida degradação do substrato é também acompanhada por perdas de N através da libertação de  $NH_3(g)$ . Com o aumento da razão C/N acima do intervalo de valores mencionado, assiste-se, também, a um aumento do período de degradação correspondente a esta fase inicial da compostagem (Haug, 1993).

Na fase inicial, dependendo dos substratos, a razão C/N pode ser superior a 30, pois, apesar da sua presença, o C poderá não estar disponível, como acontece em substratos lenhosos, ricos em lenhina. Este composto de degradação lenta (lenhina), além de não disponibilizar o C, funciona também como uma barreira física que impede o acesso dos microrganismos a outros compostos, uma vez que reduz a superfície de contacto disponível, entre esses compostos e os ditos microrganismos (Brito, 2003).

No decorrer do processo de compostagem, as perdas de C e de N ocorrem, através da formação de  $\text{CO}_2$  (g), de  $\text{NH}_3$ (g) e de  $\text{NH}_3$ (aq), a velocidades diferentes. O C liberta-se mais rapidamente do que o N e, em consequência, a relação C/N altera-se ao longo de todo o processo. No início do processo verificam-se os valores mais elevados C/N = 30, que, com o decorrer do tempo, têm tendência a baixar atingindo C/N = 15 ou até mesmo C/N = 10 (Brito, 2003).

Este parâmetro é de extrema importância para todo o processo, pois condiciona directamente o crescimento e a actividade microbial, consequentemente, todo o processo de degradação. O conhecimento da constituição química dos resíduos permite uma actuação no sentido de equilibrar a relação C/N e de promover a degradação mais rápida possível (Haug, 1993).

Enquanto alguns resíduos, como a relva, as lamas ou os dejectos de animais, apresentam elevados níveis de N, outros, como as folhas ou os ramos de árvores, apresentam reduzidos níveis da mesma substância. Assim, sempre que o substrato, a degradar, for rico em N, tornar-se-á vantajoso cobrir este substrato com outro mais pobre. Desta forma, o  $\text{NH}_3$  (g) libertado pelo substrato mais rico, poderá ser capturado e utilizado pelos microrganismos, enriquecendo o substrato mais pobre (Haug, 1993).

Em substratos menos ricos em N, o equilíbrio C/N pode ser atingido à custa da adição de ureia, de sulfatos, cloretos ou até fosfatos de amónio. Este último poderá, inclusivamente, melhorar a presença de P (fósforo) no composto final (Haug, 1993).

#### **2.1.3.5. Granulometria**

A dimensão dos pedaços e a estrutura do substrato são também factores que condicionam a velocidade das reacções químicas. Os pedaços de menor dimensão apresentam uma maior superfície de contacto com o ar e simultaneamente com os microrganismos, potenciando as condições de degradação. Quando húmidos, os substratos de estrutura menos firme têm tendência a ficarem empapados e a formar zonas anaeróbias. Nessas zonas, além das dificuldades de acesso ao  $\text{O}_2$ , existem

também dificuldades ao nível das trocas de calor, o que dificulta a degradação (Haug, 1993).

Com vista a garantir as condições de acesso ao  $O_2$  e de transferência de calor, necessárias ao desenvolvimento da compostagem, considera-se adequado que o substrato seja triturado em pedaços de tamanho médio entre 2 e 7 cm. Caso esta estratégia não promova os efeitos desejados, recorre-se à adição de materiais que confiram maior suporte estrutural e uma maior porosidade ao substrato, os agentes porosos ou agentes estruturantes.

A adição de agentes porosos promove, em condições de excesso de humidade, a manutenção ou a criação de espaços, entre as partículas que constituem o substrato. Esses espaços, posteriormente, serão ocupados por ar promovendo as trocas gasosas.

A escolha dos agentes porosos deverá ter em consideração aspectos como a dimensão dos seus constituintes, a degradabilidade, a capacidade de absorção de água, o aumento de volume acrescido e as potenciais dificuldades de manuseamento do substrato, em degradação, e a crivagem do composto final (Haug, 1993).

Através da figura 2.3. é possível percepcionar o posicionamento das partículas de um agente estruturante, entre as partículas de um substrato húmido, que permite tanto a absorção da água em excesso, como o aparecimento dos espaços livres, que proporcionam as trocas gasosas (Haug, 1993).

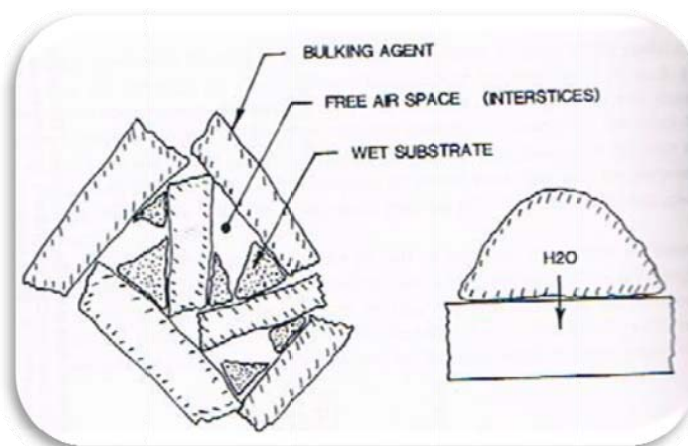


Figura 2.3: Absorção de água pelas partículas de um agente estruturante. Fonte: Haug, 1993.

Caso as partículas do agente poroso não tenham forma ou dimensão que permita o contacto entre elas ou entre as partículas do substrato, o agente poroso afunda-se no substrato húmido e não proporciona a criação dos espaços intersticiais necessários. Se

for esse o caso, regista-se um acréscimo de volume e da dificuldade de manuseamento do substrato a degradar, bem como da necessidade de aumentar a quantidade de agente poroso a incorporar.

A degradabilidade dos agentes porosos é um factor que também deve ser tomado em consideração, visto que, a sua presença ou ausência, influencia balanços de massa, de volume e de incorporação, no composto. Cascas de amendoim, cascas de nozes, cascas de arroz, engaços, pneus cortados, pedaços de madeira e de plástico ou até mesmo pedras são exemplos de materiais usados para este fim (Haug, 1993) e (Gomes, 2006). Tendencialmente, os agentes porosos deverão ser substâncias que se conservam, durante todo o processo, e cuja natureza não provoque, para além do referenciado, dificuldades de maior na crivagem do composto (separação agente poroso – composto).

A capacidade de absorção de humidade do agente poroso, para além de condicionar a sua utilização frequente, permite determinar a quantidade de agente poroso a adicionar ao substrato, para tornar a sua estrutura mais firme. Se o agente poroso estiver seco, assim que adicionado absorve um determinado volume de água do substrato, o que provoca o aparecimento dos espaços livres desejados. Quando o agente estruturante adicionado não tem capacidade de absorção de água, ou tem, mas está saturado, é necessário, respectivamente, adicioná-lo em maior quantidade ou secá-lo antes de o aplicar de novo, pois só assim serve os fins a que se destina (Haug, 1993).

#### **2.1.3.6. pH**

Os valores de pH são determinados pela presença, mais ou menos abundante, dos iões  $H^+$  (hidrogénio) e  $OH^-$  (hidróxido), durante todo o processo. Estes iões, por si só, são bastante tóxicos para os microrganismos e condicionam fortemente sua actividade. Os microrganismos não resistem quando o meio em que se encontram se torna muito ácido ou muito alcalino. É o que sucede com diversas bactérias que, quando os valores de pH se aproximam de 11, não conseguem resistir à basicidade do meio. A actividade microbiana desenvolve-se consideravelmente quando os valores de pH se encontram entre 5,5 e 8 (Haug, 1993) e (Brito, 2003).

A formação de  $CO_2$  e  $NH_3$ , durante todo o processo, respectivamente, um ácido e uma base fraca, resultantes da degradação da matéria orgânica e das proteínas são essenciais para a regulação do pH. O  $CO_2$  condiciona o excesso de iões  $OH^-$ , isto é, regula a subida excessiva do pH, evitando que se atinjam valores perigosamente alcalinos para a vida dos microrganismos. O  $NH_3$ , por sua vez, condiciona o excesso de iões  $H^+$  e a acidificação excessiva do meio para valores de pH, potencialmente, nefastos



para os referidos microrganismos, conseqüentemente, para todo o processo. O  $\text{CO}_2$  e o  $\text{NH}_3$  neutralizam o meio, funcionando como um tampão, impedindo que os valores de pH do composto se aproximem, respectivamente, do limite inferior e superior da escala de Sorensen (Haug, 1993).

No início do processo de compostagem, não é habitual efectuar correcções ao pH dos substratos. No entanto, para evitar longos períodos de inactivação dos microrganismos, tal pode suceder, caso os substratos apresentem valores de pH muito elevados (lamas) ou, simultaneamente, reduzidos valores de pH e de azoto disponível. (Haug, 1993). Com o propósito de estimular a ignição adicionam-se substâncias, resíduos alimentares (predominantemente frutos), que permitem a neutralização do meio e compensam a indisponibilidade do N, ou adoptam-se estratégias com finalidade semelhante (reciclagem dos gases provenientes da actividade microbiana e controlo de qualidade) (Haug, 1993).

No início do processo, os valores de pH seguem o sentido decrescente atingindo, durante a fase mesófila, a zona ácida, com valores de pH, próximos de 5. Com o decorrer do tempo e das reacções de degradação assiste-se a uma inversão dessa tendência de descida. Na fase termófila, o pH sobe progressivamente, atingindo a zona alcalina em valores que oscilam entre 8 e 9. Assiste-se depois, na fase de maturação, a uma estabilização dos valores de pH entre 5 e 6 (Brito, 2003).

#### **2.1.4. Qualidade do composto**

Tal como sucede com a definição de compostagem, também não existe consenso alargado em relação à definição de composto. Composto pode ser definido enquanto condicionador orgânico de solos, livre de vectores, sementes e agentes patogénicos, prejudiciais a plantas e a seres humanos, de fácil manuseamento e armazenamento, cuja aplicação beneficia o crescimento das plantas (Haug, 1993)

A qualidade do composto depende da origem dos substratos, das condições que envolvem o processo de degradação e determina-se através da análise de um conjunto de parâmetros físicos, químicos e biológicos, como sejam: o teor de humidade, de matéria orgânica, a granulometria, a presença de materiais antropogénicos (pedaços de vidro, de metal), o pH, o odor, a cor, a condutividade eléctrica, a presença de sementes, de microrganismos patogénicos, de metais pesados, bem como, do teor de N e de outros nutrientes.

Os indicadores de qualidade para composto variam de país para país. No entanto, a salientar, como regulamentação europeia aplicável, o Regulamento de Agricultura Biológica nº2092/1991/CE (até 31.12.2008) e 834/2007/CE (a partir de 1.1.2009) e a Decisão da Comissão 2006/799/CE que estabelece os critérios ecológicos revistos e os respectivos requisitos de avaliação e verificação para a atribuição do rótulo ecológico comunitário aos correctivos de solos. Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 276/2009, estabelece o regime jurídico da utilização agrícola das lamas de depuração, e transpõe para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 86/278/CEE, pode ser usado no contexto da aplicação de composto no solo. A proposta de regulamentação específica sobre a Qualidade do Composto para Utilização na Agricultura (Gonçalves & Batista, 2004), classifica os compostos produzidos em três categorias diferentes: compostos biológicos, ecológicos e correntes.

O composto biológico necessita do reconhecimento e respectiva autorização do organismo de controlo para ser aplicado como fertilizante e corrector de solos na produção biológica de produtos agrícolas. Cumpridos os critérios legais referentes à aquisição de rótulo ecológico, definidos na legislação anteriormente mencionada, o composto poderá, então, ser utilizado como corrector de solos, visando a melhoria das características físicas do solo, a sua actividade química e biológica, ou utilizado, como suporte de culturas no solo ou noutra local, onde se cultivem plantas.

No que diz respeito ao composto corrente, um composto de qualidade mínima obrigatória, a sua aplicação depende do grau de maturação, do conhecimento prévio do pH e do teor de metais pesados dos solos a que se destina esse composto, que não deverá ultrapassar os valores constantes da legislação, mencionada anteriormente (Gonçalves e Batista, 2004). Se fresco ou semi-maturado, o composto pode ser utilizado em florestas, em horticultura ou em floricultura, desde que, a aplicação no solo se efectue 3 a 4 semanas antes da sementeira/plantação. Caso o composto se encontre maturado, a sua aplicação é direccionada para suporte de cultura. No entanto, há que garantir os requisitos inerentes à aplicação do teste de fitotoxicidade relativos à produção de biomassa de cevada.

De salientar que, a estabilização do composto se relaciona com a actividade microbiológica e que a maturação está associada às vantagens que o composto poderá induzir no crescimento das plantas. Compostos instáveis apresentam elevados teores de matéria orgânica facilmente degradável e podem provocar, défices de azoto e de oxigénio, além de odores desagradáveis e fitotoxicidade (Gomes, 2006). Fitotoxicidade é

fenómeno de acumulação de substâncias nocivas nas plantas, em concentrações tais, que podem afectar o seu crescimento e desenvolvimento (Zucconi, 1981). Saliente-se que, a maior concentração dessas substâncias ocorre na fase inicial da compostagem e que existem testes que, para além de aferir o grau de estabilização do composto, permitem também aferir a qualidade de diferentes sistemas de compostagem.

Parâmetros físicos, como a temperatura ou a cor do composto, e químicos, como o pH, a relação C/N e a capacidade de troca catiónica (CEC), relacionam-se com a estabilidade do composto, mas não de forma directa, uma vez que dependem da composição inicial dos substratos a compostar (Gomes, 2006). O grau de estabilidade depende, directamente, da actividade microbiológica e pode ser mensurado recorrendo a ensaios microbiológicos, de contagem de microrganismos, de análise de ATP, de análise da actividade enzimática, a testes de respirometria, e a bioensaios, ensaios de vaso com plantas (Senesi, 1989) e (Rynk, 2003).

Os testes de respirometria e/ou de auto aquecimento revelam informações acerca do grau de estabilização do composto e podem dar indicações em relação ao estado de maturação do mesmo. (Rynk, 2003) e (Gómez *et al*, 2006). A relação directa, obtida através de testes de fitotoxicidade, entre o grau de maturidade do composto e o crescimento das plantas, está associada com a eficiência do acesso do O<sub>2</sub> durante a degradação dos substratos orgânicos. (Rynk, 2003).

A maturação do composto encontra-se associada à presença de ácidos húmicos. A presença destas substâncias proporciona, no solo, uma melhoria das suas condições de estrutura e da função de captação e fixação de nutrientes. No entanto, existem estudos que demonstram que, mais importante do que a concentração final dos ácidos húmicos, do composto, é a correlação entre o tempo de reacção e o grau de maturação desse composto. (Marques, 2008). A presença de nitratos e nitritos é também considerada, por alguns, como um indicador do grau de maturação do composto (Brito, 2003).

De uma forma mais intuitiva, através da observação directa do composto, considera-se que, a diminuição da temperatura, o aparecimento do cheiro a terra molhada ou o escurecimento do composto são indicadores de um maior grau de maturação.

## **2.2. Materiais e métodos**

Nesta secção apresenta-se a montagem laboratorial disponível para a realização dos estudos, os métodos de caracterização físico-química dos resíduos e das misturas,

no início e no final do processo de compostagem, bem como a monitorização desse mesmo processo. Apresentam-se ainda, os procedimentos aplicados na obtenção dos resíduos, na preparação das misturas e na sua caracterização.

### 2.2.1. Montagem laboratorial

A realização dos ensaios laboratoriais teve como suporte físico quatro reactores (A), uma unidade de medida da fase gasosa (B), uma unidade de controlo automático (C), um computador (D), quatro termopares, tipo K (E), uma unidade de controlo térmico (F), um analisador de CO<sub>2</sub> (G) e um medidor de fluxo mássico (H). Estes equipamentos funcionam em simultâneo de forma a garantir o controlo das condições de temperatura e de arejamento, previamente estabelecidas, e a possibilitar a monitorização do processo de compostagem, relativamente à emissão de dióxido de carbono e à temperatura.

A figura 2.4 esquematiza os equipamentos anteriormente referenciados e as respectivas interligações entre os mesmos (A preto, as instruções; a verde, os percursos do fluxo gasoso; a azul, a aquisição de sinais dos termopares, do analisador de CO<sub>2</sub> e do medidor de fluxo mássico; a laranja, o armazenamento de informações).

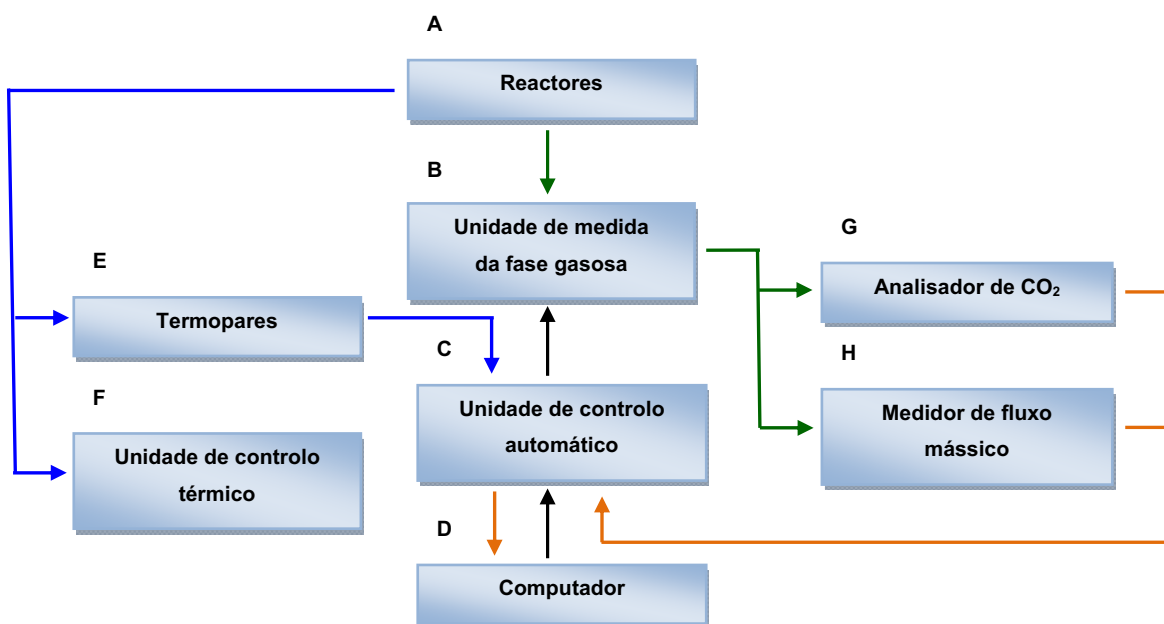


Figura 2.4: Equipamentos, respectivas acções de funcionamento e circuitos de fluxo gasoso, aquisição de dados e recolha de informações.

A figura 2.5 apresenta, respectivamente, o reactor, a cobertura em vidro acrílico, o fundo e um cesto em malha de aço, com asa metálica, de volume 3,53 dm<sup>3</sup>, cuja função é facilitar a colocação, manuseamento e recolha da massa de resíduos, a compostar, no interior do reactor.



Figura 2.5: Reactor; cobertura do reactor em vidro acrílico; fundo do reactor; cesto em malha de aço com asa.

Os reactores (A), cilindros, de parede e fundo fixo, em aço-inox 316, com 140 mm de diâmetro, 300 mm de altura e parede dupla de 3 mm, são cobertos com uma tampa em vidro acrílico, de 30 mm de espessura, perfurada que permite a colocação de acessórios (sonda de temperatura Pt100, tubagens e termopares, tipo K) para o controlo da temperatura, da monitorização das emissões gasosas e da temperatura interna do reactor. O fundo dos reactores contém um orifício que, através de uma válvula, permite a recuperação do lixiviado (purga líquida).

A unidade de medida da fase gasosa (B), da qual fazem parte quatro rotâmetros Cole Parmer de 0-1,6 dm<sup>3</sup>/min, com quatro válvulas de agulha, quinze válvulas electromagnéticas, de três vias, e um medidor de fluxo mássico, permite a recolha e a análise dos gases de exaustão dos reactores, encontra-se representada na figura 2.6.

Tendo por objectivo a captura do amoníaco, após a saída dos reactores, o fluxo de gases de exaustão borbulharam numa solução de ácido sulfúrico. De seguida, com vista a remover a humidade do fluxo remanescente, os gases são arrefecidos ao percorrerem uma coluna de condensação, por onde circula água a 10°C, e ao atravessarem um dessecante (sílica). Concluídas estas etapas, os gases resultantes são, alternadamente, enviados para o medidor de fluxo mássico e para o analisador de CO<sub>2</sub> para posterior análise.

Esta unidade de medida da fase gasosa, comandada pela unidade de controlo, funciona tanto manual como automaticamente.

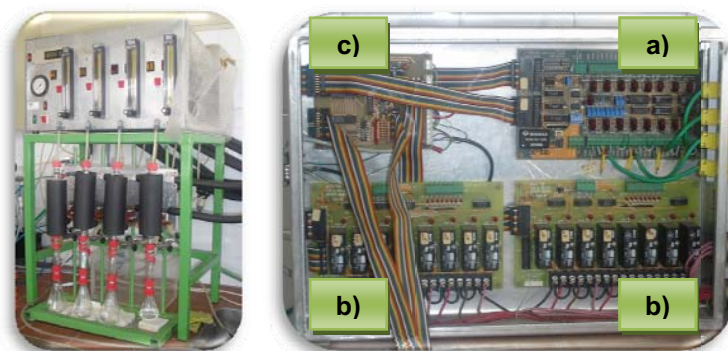


Figura 2.6: Unidade de medida da fase gasosa (esquerda) e unidade de controlo automático (direita).

Ainda na mesma figura 2.6 é apresentada a unidade de controlo automático, (C), constituída por: uma placa PCLD 889, a), do circuito de junção fria para ligação dos termopares; duas placas PCLD 786 de SSR's e relays, b), que permitem, respectivamente, a aquisição de dados dos termopares e comandar o funcionamento das electroválvulas e pela interface de multiplexagem específica da aplicação, c), que, estabelece a ligação ao analisador de  $\text{CO}_2$  e ao computador, através de uma placa de aquisição PCL 818.

O computador (D), apresentado na figura 2.7, equipado com software específico, de comandos simples, procede à sincronização das acções realizadas pela unidade de controlo automático e ao armazenamento dos diferentes conjuntos de dados.



Figura 2.7: Computador.

Os termopares (E) e a unidade de controlo térmico (F), estão representados na figura 2.8. A unidade de controlo térmico, constituída por quatro sondas Pt100, i), quatro controladores digitais, ii), e dois banhos de aquecimento, encontra-se associada aos reactores e controla a temperatura interna dos mesmos.

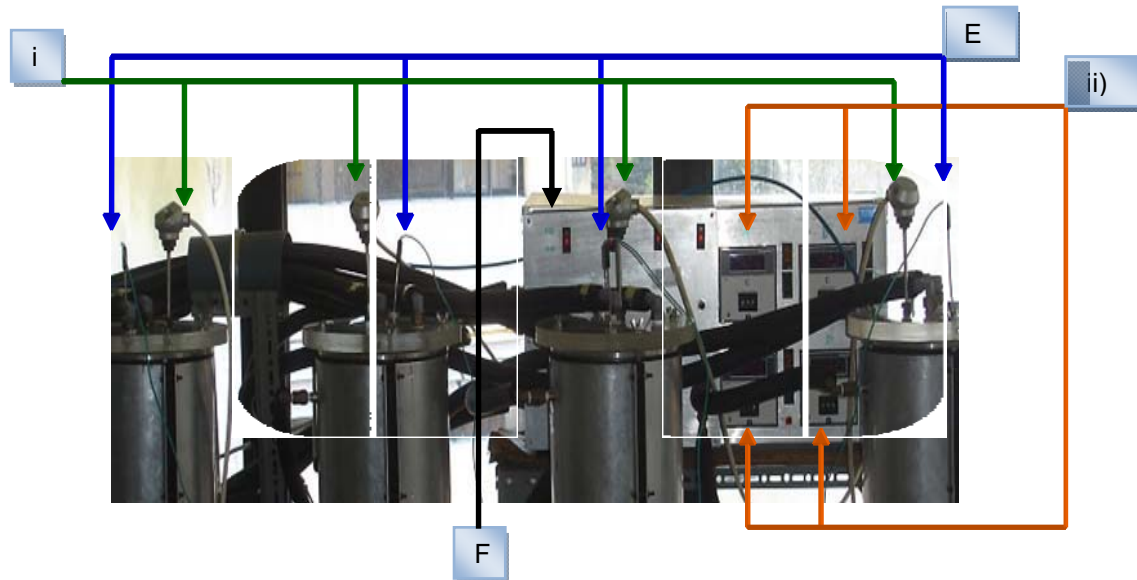


Figura 2.8: Termopares e unidade de controlo térmico (direita).

As sondas Pt100, i), inseridas nos reatores, até meia altura, através de um orifício na cobertura em vidro acrílico, fornecem os dados de temperatura aos controladores digitais, ii), onde foram pré-definidas as temperaturas operacionais internas dos reatores.

Com o intuito de manter constante a temperatura interna dos reatores (resíduos em degradação), sempre que os dados recolhidos pelas sondas não atingirem o valor pré-definido no controlador digital, inicia-se, através da bainha de 3 mm, existente entre as paredes interna e externa do reactor, um processo de admissão de água quente proveniente, tal como apresentado na figura 2.9, dos banhos de aquecimento, que proporcionam um aumento da temperatura interna do reactor.



Figura 2.9: Banhos de aquecimento.

Ao invés, se a temperatura interna do reactor for superior à temperatura pré-definida no controlador, inicia-se um processo de admissão de água fria (torneira) que, visa a diminuição da referida temperatura interna, ou seja, dos resíduos em degradação.

Tendo em conta os efeitos de transferência de energia, por convecção e condução, respectivamente, do fluxo gasoso e das paredes do reactor para o meio envolvente, as dimensões dos reactores e a consequente massa de resíduos a compostar, verifica-se que, a energia térmica libertada pelo composto não é suficiente para manter a temperatura, previamente, definida nos controladores. Torna-se, por isso, vital a utilização dos banhos de água quente, mantidos, em funcionamento contínuo, a temperatura superior à temperatura operacional, pré-definida nos controladores digitais.

A figura 2.10, mostra o analisador de  $\text{CO}_2$  (G), de leitura por infravermelho, um Visala CARBOCAP, calibrado na gama 0 a 20 (% v/v) que, após as instruções recebidas pela unidade de medida da fase gasosa, analisa, periodicamente, os gases de exaustão provenientes dos reactores.

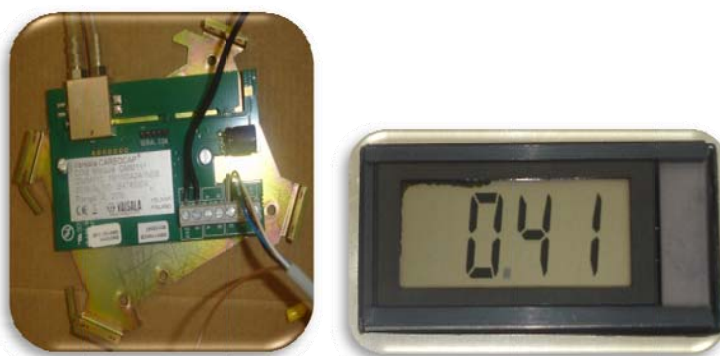


Figura 2.10: Analisador de  $\text{CO}_2$  (esquerda) e medidor de fluxo mássico (direita).

Ainda na figura 2.10, o medidor de fluxo mássico, um Aalborg com capacidade de leitura na gama de 0 a 2  $\text{dm}^3$  por minuto, efectua a leitura do fluxo de gases de exaustão provenientes do interior dos reactores, isto é, libertados pelos resíduos em degradação.

Além da aquisição de dados proporcionada pelos equipamentos referenciados anteriormente, também se utilizaram um digestor e um destilador, um Kjeltex da marca Tecator para determinação do azoto. Estes equipamentos, representados na figura 2.11, digeriram as amostras sólidas e destilaram tanto as amostras sólidas, digeridas ou por digerir, como as amostras líquidas, recolhidas nas diferentes etapas dos ensaios.





Figura 2.11: Digestor (esquerda) e destilador Kjeltrec da marca Tecator (direita).

As operações de digestão e destilação, dos diversos conjuntos de amostras sólidas e líquidas recolhidas, permitiram, por titulação, que fossem determinadas as percentagens de azoto Kjeldhal ( $N_{Kj}$ ) e azoto amoniacal ( $N_{Amon}$ ) durante os ensaios.

Foram ainda utilizados um medidor de pH, uma estufa, uma mufla, duas balanças, pêras de sucção, provetas, pipetas e outro material de vidro que permitiram determinar o pH, o teor de humidade (h) e de sólidos voláteis (SV) nas amostras sólidas e líquidas recolhidas. Também os tabuleiros de plástico, as espátulas, os goblets, as luvas de látex e a água desionizada facilitaram o manuseamento, a preparação, a caracterização de resíduos, a colocação das misturas nos reactores e evitaram contaminações.

### 2.2.2. Métodos de caracterização

De acordo com os objectivos estabelecidos para os ensaios experimentais, no que diz respeito à caracterização dos resíduos e à caracterização das misturas iniciais e das misturas compostadas, considerou-se adequado a determinação de diversos parâmetros físico-químicos. A tabela 2.1 apresenta os parâmetros físico-químicos considerados - pH, humidade (h), sólidos voláteis (SV), azoto Kjeldhal ( $N_{Kj}$ ), azoto amoniacal ( $N_{Amon}$ ), azoto orgânico ( $N_{Org}$ ) e metais, bem como, os respectivos métodos, equipamentos e condições de operação e de conservação. A determinação dos parâmetros h, SV,  $N_{Kj}$ , e  $N_{Amon}$  reflecte o valor médio dos resultados obtidos nas três réplicas efectuadas para cada amostra.

Tabela 2.1: Parâmetros físico-químicos analisados, métodos, equipamentos utilizados e condições de operação.

Parâmetro	Método	Equipamento e condições de operação
<b>pH</b>	Potenciometria	Equipamento: Potenciômetro Denver 25 com eléctrodo acoplado. Calibração: Soluções tampão de pH 4 e 7. Preparação da solução: 5g de resíduo, agitados continuamente num período de 20 minutos, num volume de solução de 0,5 dm <sup>3</sup> .
<b>Humidade</b>	Perda de peso na estufa a 100°C num período de 24h	Balança (Duas casas decimais). Estufa.
<b>Sólidos voláteis</b>	Perda de peso na mufla a 600°C num período de 2h	Balanças (Quatro casas decimais). Mufla. Protocolo: D 1102-84 do "Standard Methods for ash in wood".
<b>Azoto Kjeldhal</b>	Digestão Destilação Titulação	Equipamento: unidade de destilação e digestão Tecator Kjeltec System 1002 Distilling. Protocolo: Nota NA 86/87 da Tecator. Amostras sólidas, com massa 1g peso húmido Recolha do destilado em ácido bórico e posterior titulação com solução de ácido clorídrico.
<b>Azoto amoniacal</b>	Destilação Titulação	Equipamento: unidade de destilação e digestão Tecator Kjeltec System 1002 Distilling. Protocolo: Nota NA 86/87 da Tecator. Amostras sólidas, com massa 1g peso húmido Amostras líquidas com volume de 1,5 ml. Recolha do destilado em ácido bórico e posterior titulação com solução de ácido clorídrico.
<b>Azoto orgânico</b>	Cálculo matemático	Azoto Kjeldhal - Azoto amoniacal.
<b>Metais (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn)</b>	Espectrofotometria de Absorção Atómica da Chama	Perking Elmer. Protocolo: 3030G do SMEWW. Digestão ácida (ácido nítrico-ácido sulfúrico), sobre 1g amostra seca moída, <1mm.
<b>Índice de germinação e crescimento, I<sub>GC</sub></b>	Produção relativa de biomassa de <i>Azevem lolium multifolium</i> em 15 dias	Balança (Duas casas decimais). Estufa.
<b>Conservação</b>	Acidificação e refrigeração	Acidificação com ácido sulfúrico a pH 2.

### 2.2.3. Recolha acondicionamento e preparação dos resíduos

A preparação dos ensaios laboratoriais teve início com a recolha do resíduo de aviário, do engaço e da lama secundária de ETAR de celulose. A recolha destes três tipos de resíduos ocorreu em diferentes momentos, durante os seis primeiros meses do ano de 2007.

O resíduo de aviário, representado na figura 2.12, e recolhido após o envio das aves para abate, apresentava uma cor acastanhada, encontrava-se seco e emanava um odor intenso, facilmente associado a  $\text{NH}_3$  (g). Este resíduo é constituído, essencialmente, por dejectos das aves, resíduos da sua alimentação e casca de arroz. O engaço, também representado na figura 2.12, foi recolhido dois dias após a vindima e ficou armazenado, durante esse período, em sacos de plástico, bem fechados, e em local fresco (adeiga da propriedade). Este resíduo, de cor verde clara, encontrava-se fresco, bastante húmido e com intenso odor a álcool.



Figura 2.12: Resíduo de aviário (Esquerda); Engaço (Direita).

A lama, representada na figura 2.13, recolhida no momento da sua produção, tinha como características detectáveis a olho nu, a cor castanha clara, o aspecto fofo e floculento, elevado teor de humidade e odor intenso. Uma pá e baldes de plástico, com tampa, permitiram a recolha da lama e posterior transporte para as instalações do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, onde todos os resíduos foram identificados e guardados, na arca frigorífica, a  $-18^\circ\text{C}$ .



Figura 2.13: Lama secundária de ETAR de celulose.

#### **2.2.4. Caracterização dos resíduos**

Tendo em vista o processo de caracterização dos resíduos, a sua aglização e as diferentes misturas a estudar, efectuaram-se sobre cada um dos resíduos operações de moagem, destroçamento e corte, pós descongelação.

Uma amostra representativa do resíduo de aviário descongelado foi moída, recorrendo a um moinho de martelos de bancada.

Uma amostra representativa do engaço foi igualmente descongelada. Posteriormente, com vista a reduzir as dimensões dos pedaços e a facilitar o manuseamento, o resíduo foi cortado à tesoura e destroçado, mecanicamente, com o auxílio de um destroçador de resíduos de jardinagem.

A descongelação da lama revelou-se um processo algo moroso e até complexo sob o ponto de vista da gestão do tempo, do espaço de laboratório disponível, da cuidada utilização do mesmo e dos equipamentos afins.

Para facilitar a descongelação, os blocos de lama congelada foram cortados em pedaços de menor dimensão. De seguida, esses pedaços de lama congelada, de dimensão considerável, foram colocados em tabuleiros de plástico, sujeitos a, sucessivas, acções mecânicas de revolvimento que provocaram o seu desmembramento e aceleraram o lento processo de descongelamento da lama. De referir que, a lama perdeu a cor castanha clara e o aspecto fofo e floculento que apresentava aquando da recolha. Formaram-se duas fases distintas, uma fase líquida e uma fase sólida, tendo esta última a cor castanha escura e o aspecto de “farrapo”.

O descongelamento lento da lama, com trinta e seis horas de antecedência em relação á preparação das diversas misturas em estudo, permitiu a obtenção de uma lama em tudo semelhante à observada no momento da recolha.

A tabela 2.2 apresenta os parâmetros físico-químicos considerados adequados para a caracterização dos resíduos – pH, humidade, sólidos voláteis, azoto Kjeldhal, azoto amoniacal e azoto orgânico – bem como o valor apurado para cada parâmetro, que resulta da média dos valores obtidos nas três réplicas efectuadas, para cada amostra de resíduo.

Tabela 2.2: Valores médios apurados nas análises efectuadas aos parâmetros físico-químicos na caracterização de resíduos.

<b>Caracterização de resíduos</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Resíduo aviário</b>	<b>Engaço</b>	<b>Lama</b>
<b>pH</b>	9,48	3,76	6,75
<b>Teor de humidade, % btq</b>	28,35	73,12	90,16 / 77,5 *
<b>Teor de sólidos voláteis, % bs</b>	80,90	93,56	75,83
<b>Teor em azoto Kjeldhal, % bs</b>	2,563	0,989	5,151
<b>Teor em azoto amoniacal, % bs</b>	0,1029	0,1097	0,1278
<b>Teor em azoto orgânico, % bs</b>	2,4601	0,8793	4,589

\* Descongelção rápida / descongelção lenta

A análise dos valores das réplicas de cada parâmetro permitiu realizar um breve estudo estatístico. A tabela 2.3. apresenta o coeficiente de variação que acompanha os valores médios apurados para a humidade, sólidos voláteis, azoto Kjeldhal, azoto amoniacal e azoto orgânico.

Tabela 2.3: Coeficiente de variação associado à determinação dos parâmetros físico-químicos na caracterização dos resíduos.

<b>Coeficiente de variação</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Resíduo aviário</b>	<b>Engaço</b>	<b>Lama</b>
<b>Teor de humidade</b>	0,0081	0,0197	0,0040
<b>Teor de sólidos voláteis</b>	0,0028	0,0027	0,0105
<b>Teor em azoto Kjeldhal</b>	0,0813	0,1460	0,0121
<b>Teor em azoto amoniacal</b>	0,0057	0,0057	0,0716
<b>Teor em azoto orgânico</b>	0,0806	0,1826	0,0069

Apesar de não ter sido determinada no âmbito deste trabalho, é possível apresentar a caracterização elementar (C, H, O, N e metais) da lama e do resíduo de aviário.

A referida caracterização, apresentada na tabela 2.4, foi cedida pelos respectivos produtores.

Tabela 2.4: Análise elementar da fracção orgânica da lama e do resíduo de aviário (efectuada em laboratório externo)

<b>Análise elementar (bs)</b>		
<b>Elemento Químico</b>	<b>Resíduo Aviário</b>	<b>Lama</b>
<b>Carbono, C, (%)</b>	39,3	<b>48,8</b>
<b>Hidrogénio, H, (%)</b>	6,19	<b>6,66</b>
<b>Oxigénio, O, (%)</b>	32,8	<b>33,5</b>
<b>Azoto, N, (%)</b>	2,62	<b>4,59</b>
<b>Cádmio, Cd, (mg/kg)</b>	< LQ *	< LQ *
<b>Crómio, Cr, (mg/kg)</b>	3	<b>19</b>
<b>Cobre, Cu, (mg/kg)</b>	32	<b>15</b>
<b>Níquel, Ni, (mg/kg)</b>	2	<b>12</b>
<b>Chumbo, Pb, (mg/kg)</b>	< LQ *	<b>4</b>
<b>Zinco, Zn, (mg/kg)</b>	<b>110</b>	<b>30</b>

\* LQ – Limite quantificável.

### 2.2.5. Metodologia

Esta etapa, apresenta um conjunto de informações relevantes, de pressupostos, subjacentes à realização dos ensaios experimentais e a descrição, sucinta, da monitorização dos parâmetros físico-químicos, dos ensaios e dos procedimentos adoptados durante os mesmos.

#### 2.2.5.1. Preparação das misturas

Matematicamente foram determinadas as proporções de cada resíduo nas misturas analisadas. Este cálculo teve como premissa a adopção do valor máximo de humidade - 60% - que, genericamente, é considerado, na bibliografia da especialidade, o valor de referência para a humidade no processo de compostagem.

Foi ainda levado em consideração o facto da lama ser produzida, diariamente, em larga escala, do resíduo de aviário ser produzido, de forma regular, ao longo de todo o ano, em elevadas quantidades, e da produção de engaço ser sazonal e reduzida, em relação à dos outros resíduos.

A empresa, que cedeu o resíduo de aviário, líder de um grupo de empresas produz cerca 50% das 300 toneladas semanais produzidas pelo grupo. A produção de lama na estação de tratamento do efluente da fábrica da pasta de papel rondou, em 2008, as

10070 toneladas Na exploração vitivinícola, a produção de engaço rondou 3% da produção de uva, cerca de 600 kg, em cada vindima.

Foram realizados dois ensaios experimentais e, tanto no ensaio 1 como no ensaio 2, qualquer dos quatro reactores em funcionamento, operou em condições distintas dos restantes, no que diz respeito ora ao substrato em estudo, ora às condições experimentais, previamente definidas, de temperatura e arejamento.

O ensaio 1 foi um ensaio de teste, justificado pela necessidade de estabelecer as proporções adequadas de cada resíduo, na composição de cada uma das misturas a degradar, e as condições experimentais de operação (humidade, temperatura e arejamento) óptimas para que a degradação ocorra com a maior extensão possível. No ensaio 2 e atendendo à elevada produção de lama, considerou-se útil, sob a perspectiva da valorização deste resíduo, aumentar a proporção de lama na mistura. Adicionalmente, foram ainda analisados, individualmente, o resíduo de aviário e o engaço. Pretendeu determinar-se o comportamento e as implicações da degradação destes resíduos no processo de compostagem, das diferentes misturas em estudo.

De seguida, são apresentadas a tabela 2.5. e a tabela 2.6., onde se encontram as designações das misturas analisadas, as proporções dos resíduos em cada uma dessas misturas, bem as temperaturas de operação de cada um dos reactores, respectivamente no ensaio 1 e no ensaio 2.

Tabela 2.5: Designação, composição e condições de degradação das misturas em análise no ensaio 1.

<b>Misturas em estudo no ensaio 1</b>			
<b>Designação</b>	<b>Composição</b>		<b>Temperatura (°C)</b>
	<b>Tipo de resíduo</b>	<b>% bs</b>	
<b>LA1_45</b>	Lama	30	45
	Aviário	70	
<b>LAE1_45</b>	Lama	27	45
	Aviário	63	
	Engaço	10	
<b>LA1_55</b>	Lama	30	55
	Aviário	70	
<b>LAE1_55</b>	Lama	27	55
	Aviário	63	
	Engaço	10	

Tabela 2.6: Designação, composição e condições de degradação das misturas em análise no ensaio 2.

<b>Misturas em estudo no ensaio 2</b>			
<b>Designação</b>	<b>Composição</b>		<b>Temperatura (°C)</b>
	<b>Tipo de resíduo</b>	<b>% bs</b>	
<b>LA2_45</b>	Lama	58	45
	Aviário	42	
<b>LAE2_45</b>	Lama	53	45
	Aviário	40	
	Engaço	7	
<b>A2_45</b>	Aviário	100	45
<b>E2_45</b>	Engaço	100	45

Em ambos os ensaios, depois de estabelecidas as composições das misturas, procedeu-se à quantificação das massas, do resíduo de aviário, do engaço e da lama, correspondentes e à preparação das misturas a colocar no interior dos reactores.

Apesar de se ter estimado que as misturas seriam preparadas com humidade elevada - 60% - verificou-se, antes da colocação dos cestos nos reactores, em todas as misturas, a presença de um lixiviado inicial, indiciando, tal como se veio a confirmar experimentalmente, uma humidade superior à prevista inicialmente.

#### **2.2.5.2. Monitorização**

Tal como referido anteriormente no sub-capítulo montagem laboratorial, no ensaio 1, após a colocação das misturas, LA1\_45, LAE1\_45, LA1\_55, LAE1\_55, nos reactores teve início a monitorização dos parâmetros operacionais temperatura e caudal de ar de entrada.

No ensaio 2, as misturas LA2\_45, LAE2\_45, o resíduo de aviário, A2\_45, e o engaço, E2\_45, respectivamente, ficaram sujeitas a condições de operação semelhantes às misturas estudadas no ensaio 1 e foram analisadas através da utilização dos mesmos equipamentos.

A tabela 2.7. apresenta os parâmetros físico-químicos analisados, em cada uma das fases monitorizadas (sólida, líquida e gasosa), na caracterização individual dos resíduos e na monitorização de todo o processo de degradação das misturas em estudo.



Tabela 2.7: Parâmetros físico-químicos analisados nas diferentes fases em estudo.

Fase sólida	Fase líquida		Fase gasosa
	Lixiviado	Condensado	
Humidade	pH	Azoto Kjedral	CO <sub>2</sub>
Sólidos voláteis	Azoto Kjedral		NH <sub>3</sub>
pH			
Azoto Kjedral			

De acordo com o esquema da figura 2.14, uma vez iniciada a degradação dos resíduos, efectuaram-se periódica e sequencialmente operações de recolha do lixiviado e de abertura dos reactores. Após 2 dias (48 horas), 6 dias (114 horas), 15 dias (360 horas) e 21 dias (504 horas) de degradação dos substratos dentro dos reactores. Nestas aberturas recolheram-se amostras, da fase sólida, para análise e procedeu-se ao revolvimento, manual, das misturas. Os equipamentos de controle e análise permitiram quantificar o teor de CO<sub>2</sub>, em intervalos, aproximadamente, de 40 minutos, e capturar o NH<sub>3</sub> (g) arrastado no efluente gasoso, cumulativamente para todo o processo. O lixiviado, fase líquida, foi recolhido 2 a 3 dias após o início ou reinício do ensaio. Período semelhante separava a recolha do lixiviado da nova abertura do reactor.

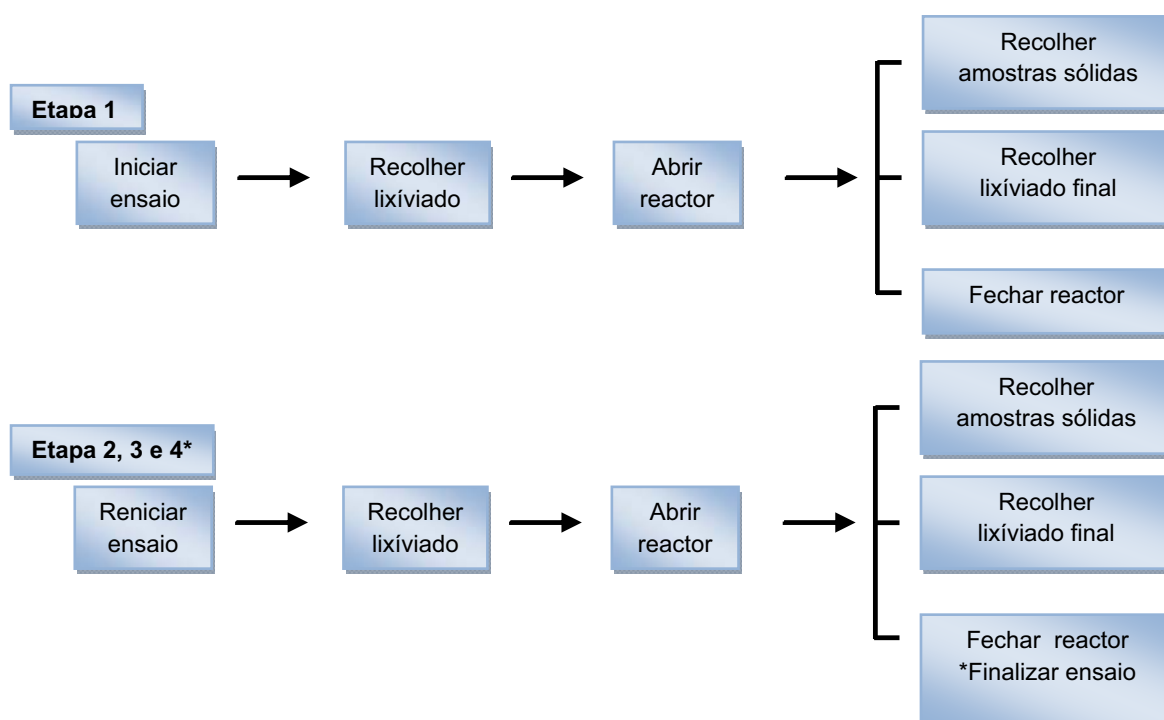


Figura 2.14: Descrição das etapas que constituíram os ensaios laboratoriais.

### 2.2.5.3. Procedimento experimental

Os procedimentos de recolha das amostras sólidas, com vista à determinação do pH, da humidade e dos sólidos voláteis das misturas, tiveram início três a quatro horas antes de cada abertura, com a diminuição progressiva das temperaturas operacionais dos reactores<sup>5</sup>.

Findo esse período, e depois de retiradas as sondas de temperatura e as tampas de vidro acrílico, procede-se à abertura dos reactores.

Registou-se a massa do conjunto cesto metálico-mistura em degradação, transferiu-se a mistura para um tabuleiro de plástico e, com intuito de otimizar a homogeneidade das amostras a recolher, revolveu-se a mistura no tabuleiro de plástico, com o auxílio de espátulas.

Recolheram-se e anotaram-se sucessivamente as massas de três réplicas de cada mistura que, depois de acondicionadas nos cadinhos, foram transportadas para a estufa. Respeitado o período de permanência, foi medida e anotada a massa de cada uma das réplicas de cada mistura.

Em seguida os cadinhos com as diferentes réplicas foram colocados na mufla e, depois de cumprido o tempo de permanência adequado, procedeu-se às medições e registos de massas o que permitiu determinar, experimentalmente, os valores médios de humidade e de sólidos voláteis das diferentes misturas em estudo.

Para a determinação do pH das misturas, as amostras recolhidas foram preparadas em conformidade com os procedimentos descritos na Tabela 2.1.

O lixiviado recolheu-se ora através das válvulas, ora com o auxílio de pipetas, sempre que se encontrava aprisionado no fundo dos reactores. Imediatamente após a sua recolha foi determinado o pH, seguidamente, a amostra foi preservada em meio ácido (ácido sulfúrico) e armazenada num frigorífico. As várias amostras de lixiviado recolhido, de cada reactor, foram adicionadas, constituindo uma amostra composta de cada ensaio, para posterior análise de  $N_{kj}$ . A conservação e as análises de pH, de  $N_{kj}$  e  $N_{Amon}$  efectuadas a esse lixiviado respeitaram os procedimentos descritos na Tabela 2.1.

---

<sup>5</sup> Este arrefecimento pretendeu promover condições de equilíbrio no que concerne a temperatura e a humidade, no interior e no exterior dos reactores, minimizando a perda de massa de água, por evaporação, das misturas em estudo.

Terminada a recolha das amostras sólidas e líquidas (lixiviado), cada conjunto cesto metálico–mistura degradada, antes de ser recolocado no reactor correspondente, ficou sujeito a uma nova medição e registo de massa.

Fechados os reactores com as tampas de vidro acrílico, ajustadas, a meia altura, as sondas de temperatura e redefinidas, nos controladores digitais, as temperaturas iniciais de operação, as misturas ficaram novamente sujeitas a um ambiente condicionado, sob acção e monitorização dos equipamentos referenciados na figura 2.4. Entre as sucessivas aberturas dos reactores, o lixiviado (purga) era recolhido, periodicamente, de dois em dois ou de três em três dias, através das válvulas situadas no fundo dos reactores.

Os equipamentos de controlo utilizados permitiram a inversão periódica do sentido do caudal de ar de arejamento, proporcionando a todos os pontos da mistura, no interior do reactor, condições semelhantes de humidade e de oxigenação.

O fluxo gasoso de exaustão de cada reactor, antes de ser analisado, borbulhou em 500 ml de solução 0,5 molar de ácido sulfúrico permitindo a captura cumulativa de  $\text{NH}_3$  (g) e, posteriormente, a quantificação do azoto amoniacal mediante a análise de três réplicas de 1,5 ml cada de solução de absorção (ver tabela 2.1) (Komilis, 2005).

### **2.3. Resultados e discussão**

Este trabalho realizado em dois momentos distintos, visa analisar e otimizar a valorização dos resíduos, em estudo, de forma combinada. Os dados recolhidos, durante os ensaios efectuados no primeiro momento, permitiram perceber o comportamento das misturas em degradação e, posteriormente, estabelecer, para o segundo momento, o novo conjunto de ensaios, a nova composição das misturas, a estudar, e as condições mais favoráveis à degradação.

No ensaio 1 os valores iniciais do pH, das misturas que contêm engaço, não foram medidos. Comparativamente à quantidade de lama e de resíduo de aviário, que constitui as misturas em estudo, a presença de engaço é diminuta, pelo que, no que diz respeito ao pH, se considerou que, essa contribuição teria pouco impacto. Em relação à humidade, ao teor de sólidos voláteis e à massa seca, neste primeiro ensaio, tendo em conta a heterogeneidade das misturas, os valores iniciais foram determinados através do cálculo ponderado destes parâmetros, para cada um dos substratos.

Nas primeiras horas de reacção foi detectada, no programa informático, uma instrução incompleta, relacionada com a inversão do caudal de ar de alimentação dos reactores que, prontamente foi rectificada.

Da monitorização dos ensaios 1 e 2 resulta o conjunto de dados que, seguidamente se apresenta. Recorde-se que, com a realização do ensaio 1, foram estabelecidas as composições das misturas, as condições experimentais de temperatura e de arejamento mais adequadas à degradação combinada da lama, do resíduo de aviário e do engaço. Assente no ensaio 1, no ensaio 2, foi estudada a degradação das misturas LA2\_45, LAE2\_45 e monitorizada, isoladamente, a degradação do resíduo de aviário e do engaço, com vista a compreender a contribuição destes resíduos na degradação das misturas acima referenciadas.

### 2.3.1. Humidade

O valor de 60% de humidade esteve subjacente à preparação de todas as misturas. A adopção deste valor de referência teve em consideração a heterogeneidade dos diferentes substratos que constituem as misturas. No entanto, apesar dos pressupostos teóricos, a humidade inicial das misturas, LA1\_45, LA1\_55, LAE1\_45 e LAE1\_55, determinada através do cálculo ponderado da humidade de cada um dos substratos, foi superior ao valor de referência adoptado.

Recorrendo à, equação 2.1, que relaciona matematicamente a massa de amostra de material sólido tal e qual ( $M_{tq}$ ) e a massa de amostra seca (massa de material sólido após secagem na estufa, a 120°C, durante 2h) ( $M_s$ ), é possível determinar a percentagem de humidade, das amostras, de todos os substratos em estudo.

$$\% h = \frac{M_{tq} - M_s}{M_{tq}} \times 100 \quad \text{Eq: 2.1}$$

A figura 2.15 revela, no período correspondente às aberturas dos reactores, a evolução do parâmetro humidade, nas misturas em estudo no ensaio 1.

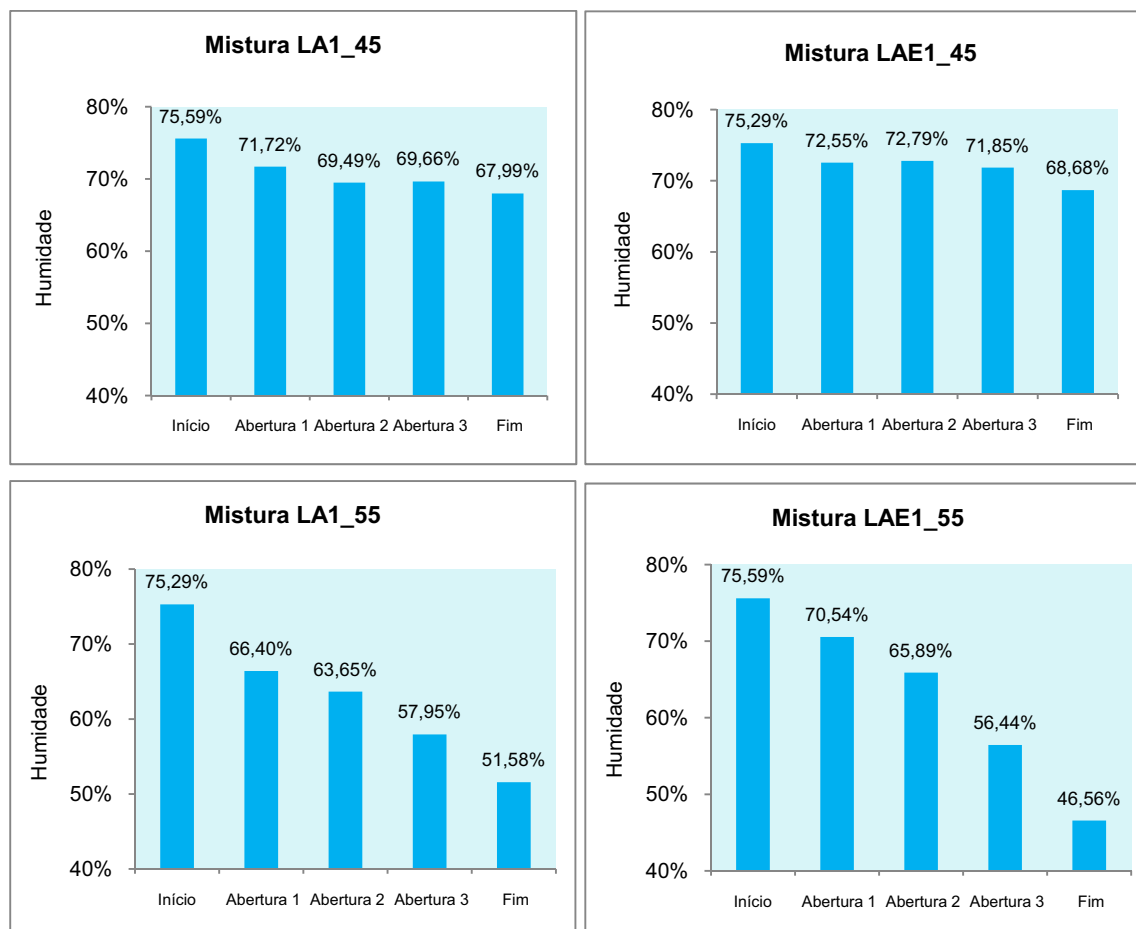


Figura 2.15: Evolução da humidade nas misturas LA1\_45, LAE1\_45, LA1\_55 e LAE1\_55.

Verifica-se que, a mistura LA1\_45 apresenta níveis de humidade superiores e mais homogêneos do que os da mistura LA1\_55. Na abertura 1, a humidade da LA1\_45 é ligeiramente superior a 70%. Daí em diante, os níveis de humidade, desta mistura, oscilam dentro do intervalo compreendido entre os 60 e os 70%.

Na abertura 1, a humidade da LA1\_55 é inferior a 70% e, nas aberturas subsequentes, observa-se a diminuição progressiva desses valores até um mínimo de 50% de humidade, no fim do ensaio.

Nas misturas LAE1\_45 e LAE1\_55, a humidade evolui de forma distinta. Na mistura LAE1\_45 decresce suavemente no decurso do ensaio, sem nunca atingir níveis inferiores a 60%, ao contrário do que sucede na LAE1\_55, onde os níveis de humidade diminuem fortemente atingindo, na abertura final, valores inferiores a 50%.

Ao contrário do que sucede nos ensaios realizados a 45°C, os ensaios realizados a 55°C promovem, ao longo do processo, a perda de humidade.

A 45°C, a presença de engaço não interfere na evolução da humidade das misturas, mas, a 55°C, acentua a secagem do material.

A figura 2.16 revela, no período correspondente ao ensaio 2, a evolução do parâmetro humidade nas misturas LA2\_45 e LAE2\_45, no resíduo de aviário e no engaço.

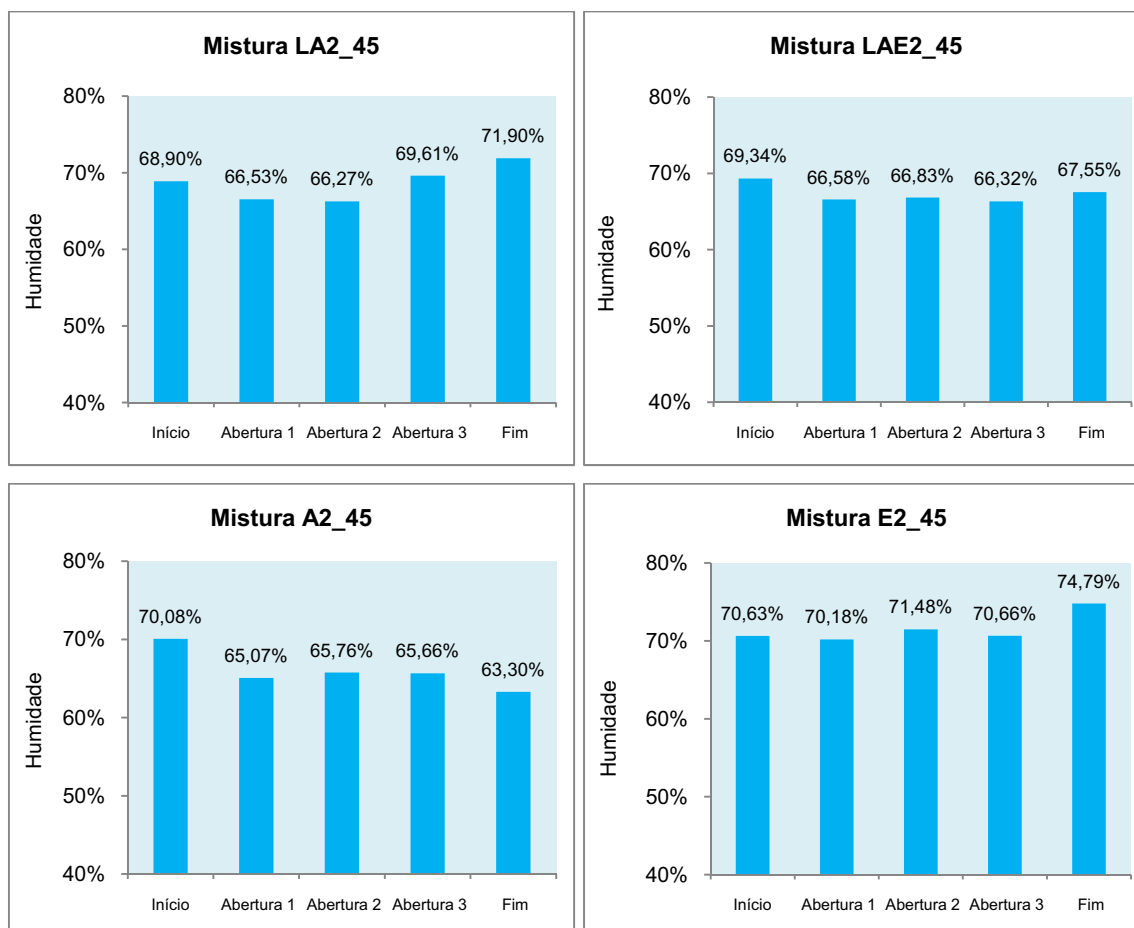


Figura 2.16: Evolução da humidade nas misturas LA2\_45, LAE2\_45, no resíduo de aviário, A2\_45, e no engaço, E2\_45.

Em qualquer uma das misturas em estudo, a humidade mantém-se elevada.

### 2.3.2. Massa Seca

A obtenção, em ambos os ensaios, dos valores de  $M_{seca}$  existente em cada reactor de material sólido tal qual ( $M_{talqual}$ ) resulta da aplicação da equação 2.2.

$$M_{seca} = M_{talqual} (100 - \% h) \quad \text{Eq: 2.2}$$

A figura 2.17 diz respeito aos resultados obtidos pela determinação da massa seca, respectivamente, nas misturas LA1\_45, LAE1\_45, LA1\_55 e LAE1\_55.

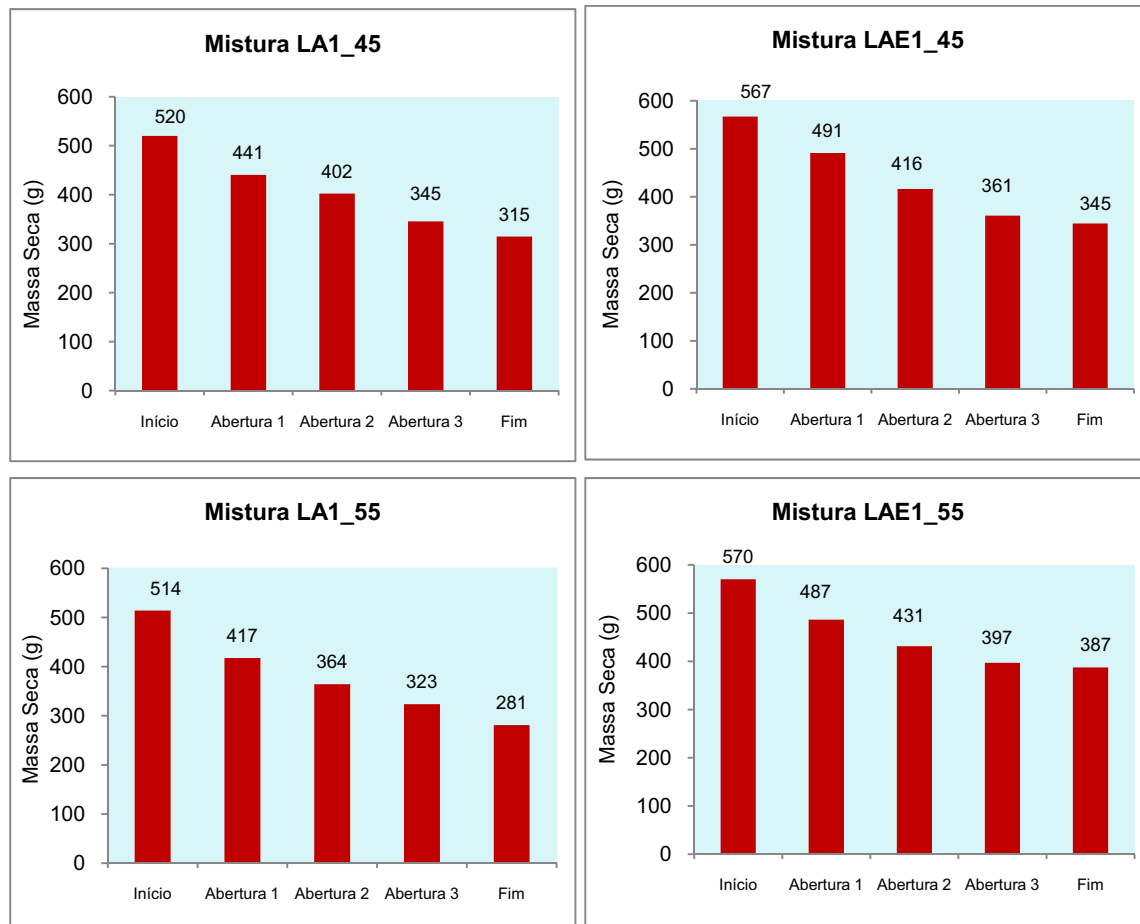


Figura 2.17: Evolução da massa seca nas misturas LA1\_45, LAE1\_45, LA1\_55 e LAE1\_55

Observa-se que, ambas as misturas, LA1\_45 e LA1\_55 apresentam, ao longo do ensaio, uma tendência decrescente, mais acentuada em LA1\_55. LAE1\_45 e LAE1\_55 evidenciam tendência decrescente e semelhante entre si.

De entre as misturas que contêm engaço, LAE1\_45 apresenta, no final do ensaio, uma maior redução relativa.

Tanto a 45°C como a 55°C, o engaço surge nas misturas como um elemento diferenciador, uma vez que as misturas LAE1\_45 e LAE1\_55 apresentam valores de massa seca superiores aos das misturas cuja composição é apenas lama e resíduo de aviário.

Verificou-se uma redução relativa na massa seca de 40%, de 39%, de 45% e de 32%, respectivamente, para LA1\_45, LAE1\_45, LA1\_55 e LAE1\_55.

A figura 2.18 diz respeito aos resultados obtidos na determinação da massa seca nas misturas LA2\_45, LAE2\_45 bem como no resíduo de aviário, A2\_45, e no engaço, E2\_45.

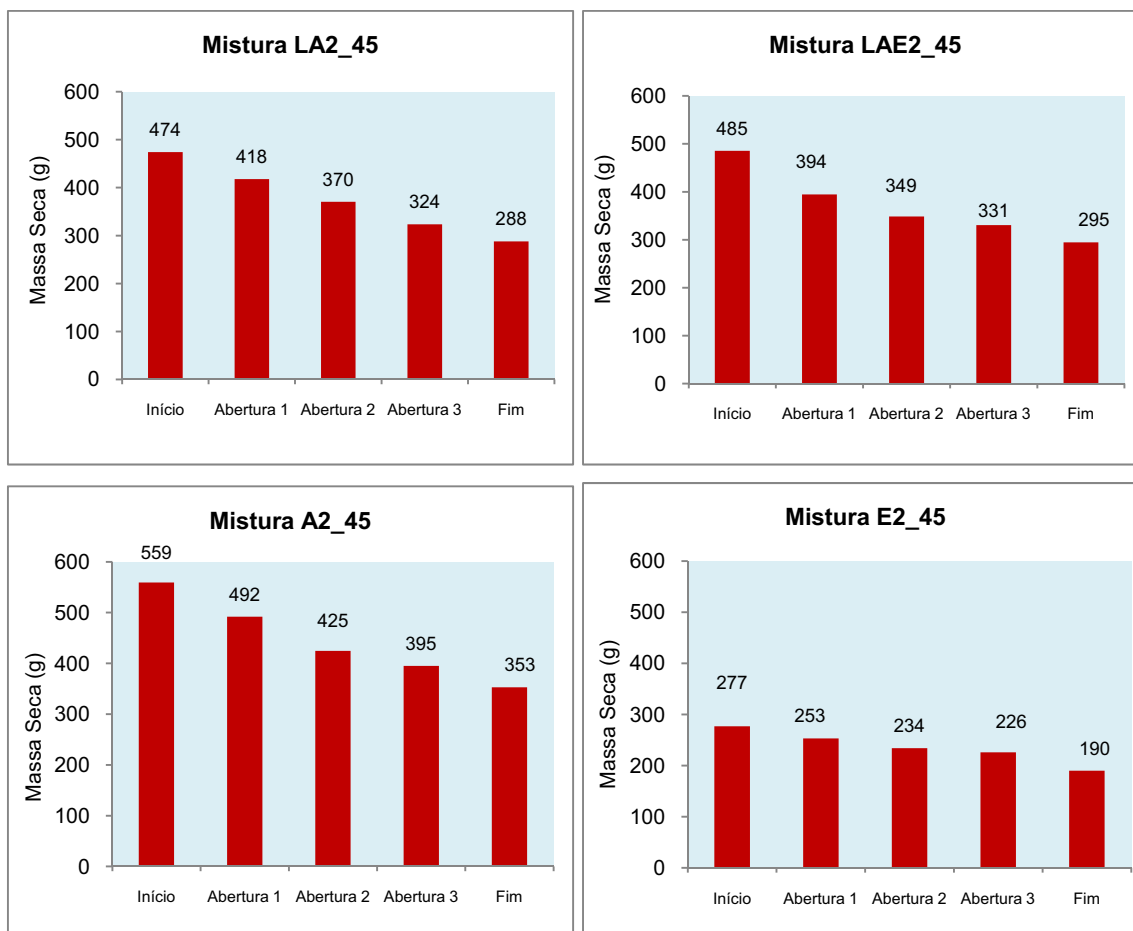


Figura 2.18: Evolução da massa seca nas misturas LA2\_45, LAE2\_45, no resíduo de aviário, A2\_45, e no engaço, E2\_45.

Em todas as aberturas, as misturas LA2\_45 e LAE2\_45, apresentam uma significativa diminuição da massa seca, correspondendo, respectivamente, a 36% e 39%. Também no resíduo de aviário, A2\_45, se observa uma diminuição significativa da massa seca, semelhante à verificada nas misturas em estudo, 37%. Relativamente ao engaço, E2\_45, é possível observar que a diminuição da massa seca é muito ténue, 31%.

### 2.3.3. Sólidos Voláteis

O teor de sólidos voláteis (% SV) indica a percentagem, em base seca, de matéria orgânica contida nos diferentes substratos. Os valores obtidos, em ambos os ensaios, resultam da aplicação da equação 2.3, são seguidamente apresentados nas figuras 2.19 e 2.20. Esta equação 2.3 relaciona a massa de amostra seca,  $M_s$  (massa de material sólido após a secagem na estufa) e a massa de amostra de material sólido, após calcinação na mufla ( $M_c$ ).

$$\% SV = \frac{M_s - M_c}{M_s} \times 100 \quad \text{Eq: 2.3}$$



A equação 2.4 relaciona o teor de sólidos voláteis, em base seca, % SV e a massa de material sólido no reator ( $M_{seco}$ ), em cada uma das aberturas, e permite a determinação, em cada um desses momentos, da massa de sólidos voláteis ( $M_{SVi}$ ).

$$M_{SVi} = M_{seca} \left( \frac{\% SV}{100} \right) \quad \text{Eq: 2.4}$$

A figura 2.19 evidencia o comportamento da fracção de sólidos voláteis, em base seca, respectivamente nas misturas LA1\_45, LAE1\_45, LA1\_55 e LAE1\_55.

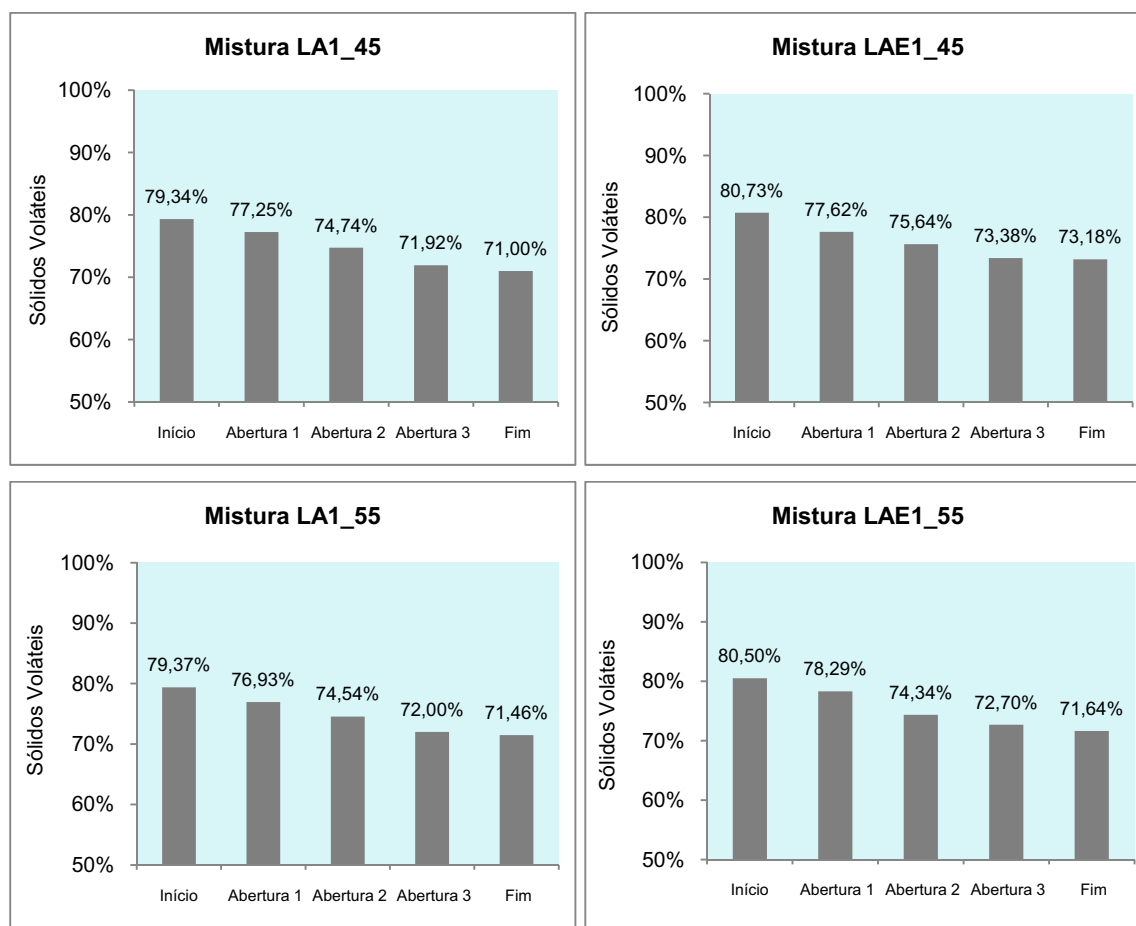


Figura 2.19: Evolução dos sólidos voláteis nas misturas LA1\_45, LAE1\_45, LA1\_55 e LAE1\_55.

LA1\_45 e a LA1\_55 apresentam neste parâmetro comportamentos semelhantes. Também em LAE1\_45 e em LAE1\_55 se verifica um, progressivo e suave, decréscimo dos sólidos voláteis destas misturas. De referir que, LAE1\_55 apresenta uma descida mais acentuada na abertura 2 e, no final do ensaio, um teor de sólidos voláteis inferior ao apresentado pela mistura LAE1\_45.

Em qualquer uma das misturas analisadas não se verificam diferenças significativas em relação à evolução dos sólidos voláteis. No entanto de registar que, no final do

ensaio, qualquer uma das misturas apresenta ainda valores consideráveis neste parâmetro, 70% (bs).

A figura 2.20 evidencia o comportamento das misturas LA2\_45, LAE2\_45, do resíduo de aviário e do engaço, no que concerne ao parâmetro físico-químico sólidos voláteis.

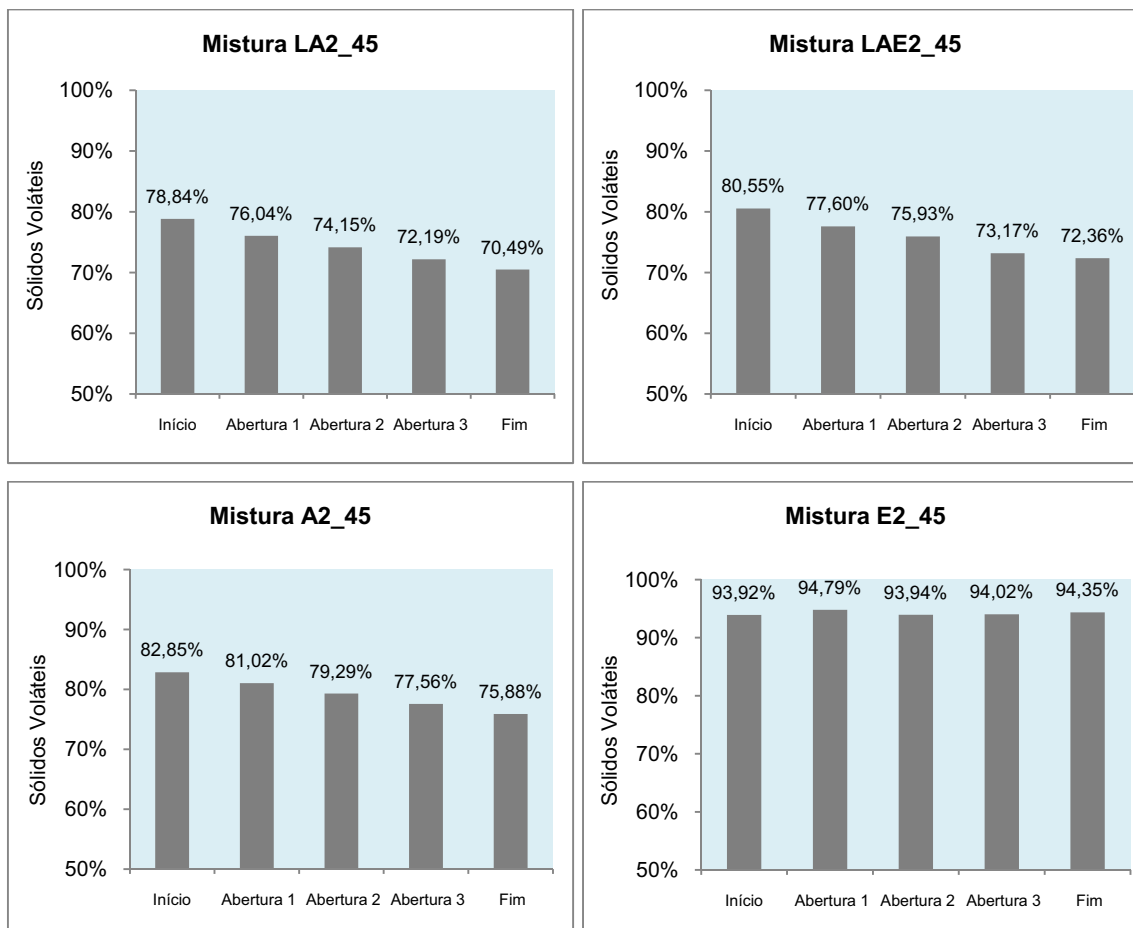


Figura 2.20: Evolução dos sólidos voláteis nas misturas LA2\_45, LAE2\_45, no resíduo de aviário, A2\_45, e no engaço, E2\_45.

Constata-se que, ambas as misturas, LA2\_45 e LAE2\_45 apresentam comportamento semelhante em relação a este parâmetro. Observa-se, ao longo de todo o ensaio, para ambas as misturas, uma diminuição nos valores do teor de sólidos voláteis, com LAE2\_45 a atingir valores superiores aos apresentados por LA2\_45.

Os dados respeitantes a A2\_45, evidenciam a diminuição do teor de sólidos voláteis. De salientar que, tanto no início como no fim do ensaio, os sólidos voláteis determinados para A2\_45 são superiores aos determinados para as misturas LA2\_45 e

LAE2\_45. Relativamente à degradação do engaço, E2\_45, os valores observados podem indicar que a reacção de degradação deste resíduo é, praticamente, imperceptível.

### 2.3.4. Grau de conversão

O grau de conversão da massa de SV, em cada abertura, ( $X_{SVi}$ ), determinado pela equação 2.5, relaciona a massa de SV inicial ( $M_{SV0}$ ) e a massa de SV no momento da abertura ( $M_{SVi}$ ) e surge corrigido em relação à massa de SV de amostra retirada para análise (Ver anexos).

$$X_{SVi} = \frac{M_{SV0} - M_{SVi}}{M_{SV0}} \quad \text{Eq: 2.5}$$

A figura 2.21 apresenta os graus de conversão de sólidos voláteis determinados em cada uma das aberturas dos reactores para as misturas em estudo neste ensaio 1.

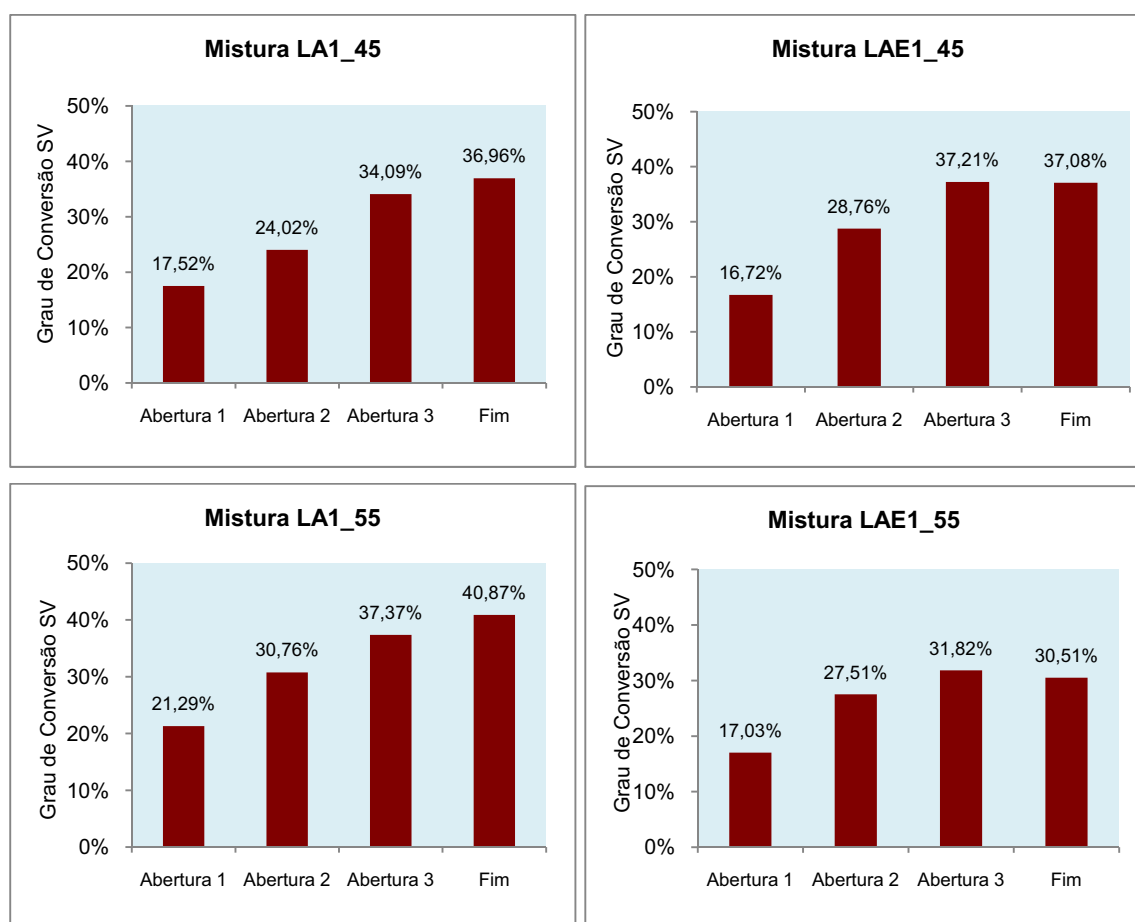


Figura 2.21: Evolução do grau de conversão das misturas LA1\_45, LAE1\_45, LA1\_55 e LAE1\_55.

Em ambas as misturas LA1\_45 e LA1\_55, o grau de conversão é progressivamente crescente atingindo, no final do ensaio, respectivamente, 37% e 40%. Nota-se que, na

mistura LA1\_45, em todas as aberturas dos reactores, esse crescimento é, ligeiramente, inferior ao determinado na mistura LA1\_55.

As misturas LAE1\_45 e LAE1\_55, apresentam igualmente uma tendência de crescimento do grau de conversão até à abertura 3, atingindo, respectivamente, 37% e 32%. No final do ensaio, o valor estabiliza. Para estas misturas, o valor do grau de conversão de sólidos voláteis, na abertura final, traduz a falta de representatividade das amostras analisadas. Provavelmente, consequência da heterogeneidade das misturas, associada à presença de engajo, com o erro de amostragem a prevalecer sobre as ligeiras variações do grau de conversão nesta última fase do ensaio.

A 55°C, na mistura com menor percentagem de lama, o engajo não favorece a reacção de conversão de sólidos voláteis.

De salientar ainda que, genericamente, os valores obtidos para LAE1\_45 são superiores aos obtidos para LAE1\_55.

O grau de conversão da massa de SV, obtido através da equação 2.6, tem por base três medições experimentais: a medição da massa do meio reaccional; a medição da humidade, equação 2.1, e medição do teor de sólidos voláteis pela equação 2.2.

Em contexto extra laboratorial, à escala industrial, a determinação do grau de conversão de SV torna-se impraticável, nomeadamente, pela impossibilidade de medir a totalidade da massa do material reaccional. É por isso necessário recorrer a um outro método de cálculo.

O método de cálculo alternativo, assenta na determinação experimental de dois parâmetros, o teor em humidade e o teor em sólidos voláteis e no pressuposto de que, no processo de degradação microbiológico, a massa de cinzas se mantém constante (Bach *et al*, 1984). O grau de conversão SV na base cinza constante,  $X'_{SVi}$ , é determinado pela equação 2.6, onde %SV<sub>0</sub> representa o teor de sólidos voláteis, em base seca, no instante inicial e %SV<sub>i</sub> o teor de sólidos voláteis, em base seca, no instante i.

$$X'_{SVi} = \left[ \frac{\%SV_0}{100} - \frac{\%SV_i}{100} \right] / \left[ \frac{\%SV_0}{100} \left( 1 - \frac{\%SV_i}{100} \right) \right] \quad \text{Eq: 2.6}$$

A figura 2.22 apresenta, para o ensaio 1, o grau de conversão de SV, calculado pelos dois processos descritos.

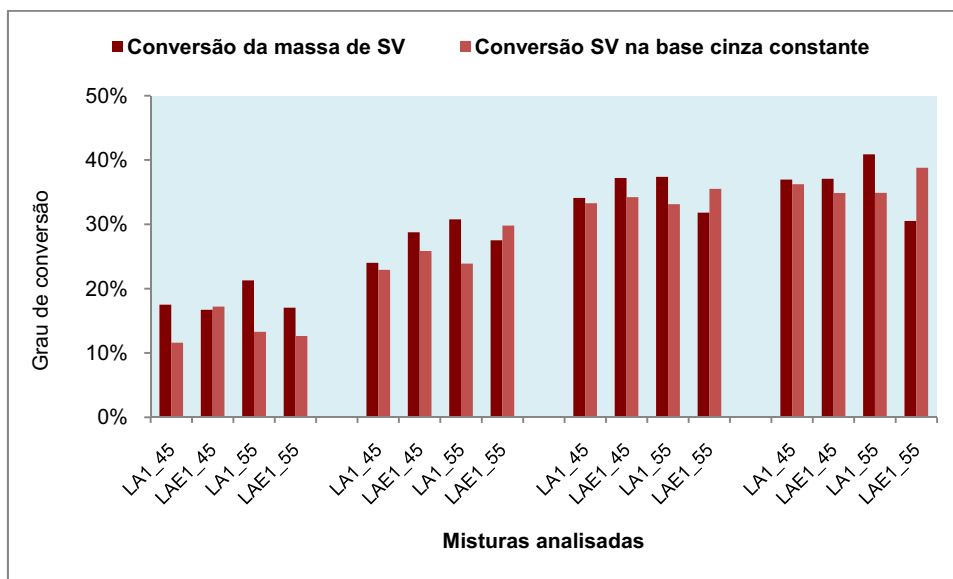


Figura 2.22: Grau de conversão da massa de SV vs Grau de conversão de SV na base cinza constante, por abertura, durante o ensaio 1.

Considerando LA1\_45 e LA1\_55, é em LA1\_55 que se observam valores superiores do grau de conversão de SV.

No que diz respeito às misturas LAE1\_45 e LAE1\_55, é LAE1\_45 que apresenta os valores mais elevados do grau de conversão de SV.

A figura 2.23 apresenta os graus de conversão determinados em cada uma das aberturas dos reactores, para as misturas e resíduos, em estudo neste ensaio 2.

O grau de conversão de sólidos voláteis das misturas LA2\_45 e a LAE2\_45 é, tendencialmente, crescente e mais notório, nas duas primeiras aberturas, para LAE2\_45 e, nas duas últimas aberturas, para LA2\_45, o que torna, no final do ensaio, o grau de conversão final muito semelhante para ambas, 36 %. Eventualmente, o engajo, a 45°C, provocará, numa fase inicial, um efeito mais acentuado no grau de conversão da mistura com maior percentagem de lama.

Também em A2\_45 se verifica o crescimento do grau de conversão de sólidos voláteis do resíduo de aviário, que atinge, no final do ensaio os 33%.

Ao invés, no engajo, E2\_45, o grau de conversão de sólidos voláteis é bastante inferior aos observados anteriormente para misturas e para degradação do resíduo de aviário. Confirma-se a fraca degradação do engajo, 14%, facto que vinha sendo evidenciado pela análise dos parâmetros anteriormente estudados.

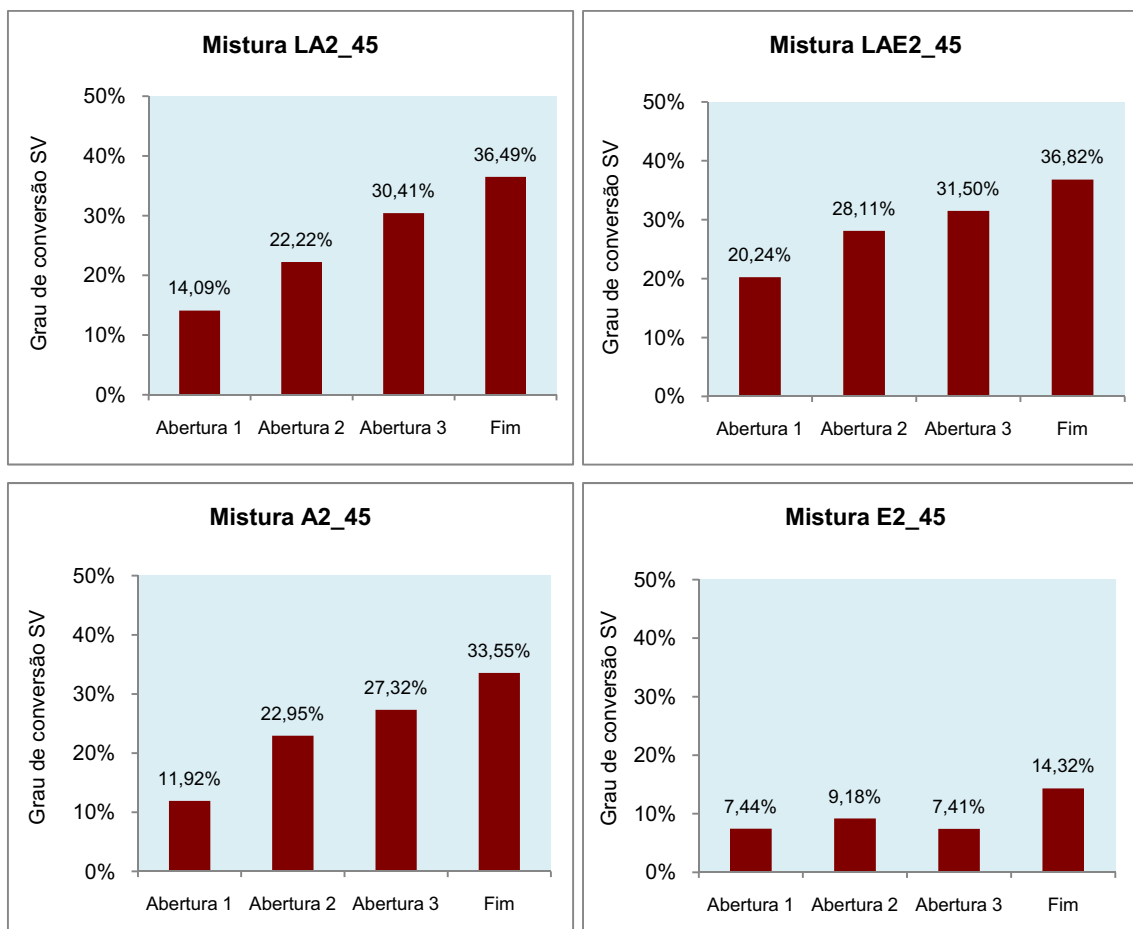


Figura 2.23: Evolução do grau de conversão nas misturas LA2\_45, LAE2\_45, no resíduo de aviário, A2\_45, e no engaço, E2\_45.

À semelhança da figura 2.22, para o ensaio 1, a figura 2.24, apresenta para o ensaio 2 o grau de conversão de sólidos voláteis.

Nas misturas LA2\_45 e LAE2\_45, o grau de conversão da massa de SV, é sempre superior em LAE2\_45 e também superior ao grau de conversão de SV na base de cinza constante.

A2\_45, apresenta, nas duas aberturas iniciais, um comportamento semelhante às misturas LA2\_45 e LAE2\_45 e, nas aberturas 3 e 4, os valores observados no grau de conversão de SV cinza constante são superiores aos observados para o grau de conversão da massa de SV.

O engaço, E2\_45, apresenta, em todas as aberturas, um grau de conversão da massa de SV inferior ao de todos os outros substratos em estudo. De referir que, a reduzida taxa de degradação do engaço não permitiu perceber o grau de conversão de SV na base de cinza constante.

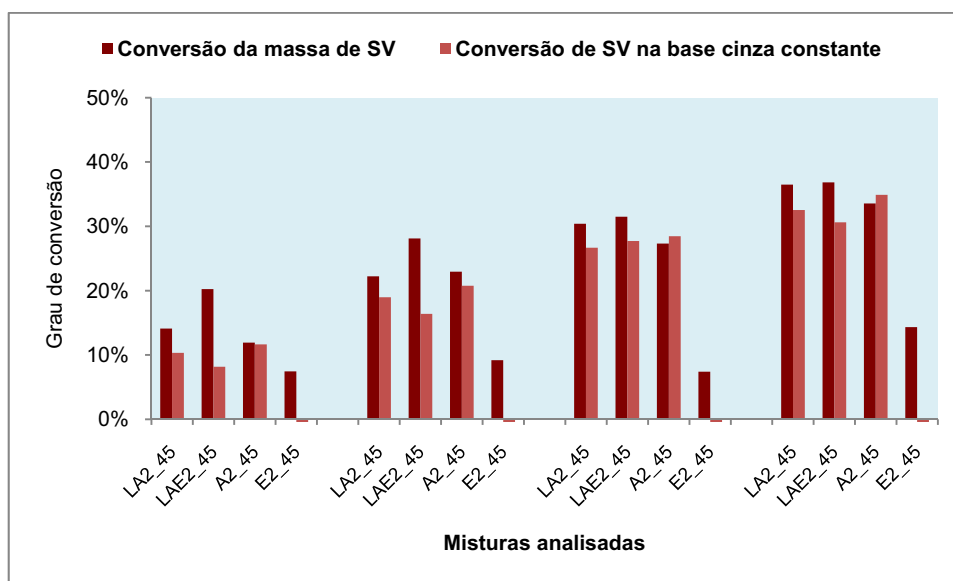


Figura 2.24: Grau de conversão da massa de SV vs Grau de conversão de SV na base cinza constante, por abertura, durante o ensaio 2.

### 2.3.5. pH

A figura 2.25 permite acompanhar, ao longo de todo o ensaio, a evolução do pH nas misturas LA1\_45 e LA1\_55 e, a partir da abertura 1, as misturas LAE1\_45 e LAE1\_55.

No que diz respeito às misturas cuja composição é lama e resíduo de aviário, LA1\_45 e LA1\_55, observa-se que, ambas, apresentam, inicialmente, pH neutro e, ao longo do ensaio, evoluem de forma semelhante, no sentido ascendente da escala de pH atingindo, no final do ensaio, a zona alcalina, com valores de pH, próximos de 9.

De destacar que, durante as primeiras horas de reacção, até à abertura 1 dos reactores, o pH da mistura LA1\_55 evoluiu de forma mais acentuada do que o da mistura LA1\_45.

Nas misturas LAE1\_45 e LAE1\_55 que contêm, além da lama e do resíduo de aviário, o engaço, de acordo com os dados disponíveis, a evolução do pH das misturas é semelhante. Em todas as aberturas, os valores do pH de LAE1\_45 e de LAE1\_55, encontram-se próximos de 9, indicando o carácter alcalino destas misturas. No entanto, nas aberturas 3 e 4, os valores de pH da mistura LAE1\_55 são ligeiramente superiores aos observados em LAE1\_45.

O pH não apresenta valores que possam inibir o processo de degradação das misturas e a sua evolução, ao longo do ensaio, é independente da temperatura.

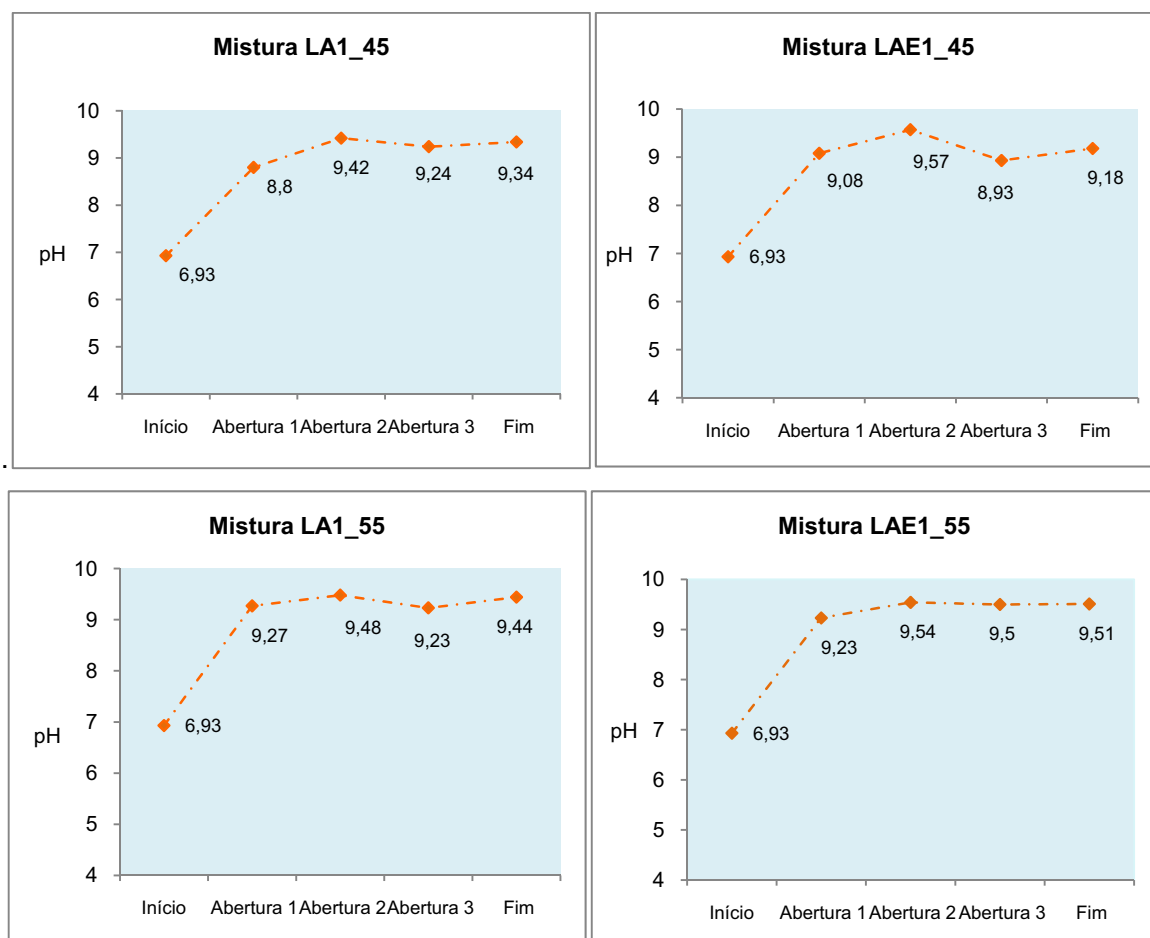


Figura 2.25: Evolução do pH nas misturas LA1\_45, LAE1\_45, LA1\_55 e LAE1\_55.

A figura 2.26 permite acompanhar a evolução do pH nas misturas LA2\_45 e LAE2\_45, bem como a degradação isolada do resíduo de aviário, A2\_45, e do engaço, E2\_45.

Em LA2\_45 e LAE2\_45 os valores de pH registam evolução semelhante. Os valores iniciais de pH revelam o carácter alcalino de ambas as misturas, com LA2\_45 a apresentar pH inicial superior ao de LAE2\_45.

No resíduo de aviário, A2\_45, apesar das suaves flutuações, o pH encontra-se, claramente, na zona alcalina.

No engaço, E2\_45, também se verificam ligeiras flutuações, mas dentro da zona ácida. A inactivação do processo de degradação do engaço, pode estar relacionada com a acidez do engaço, durante todo o ensaio.



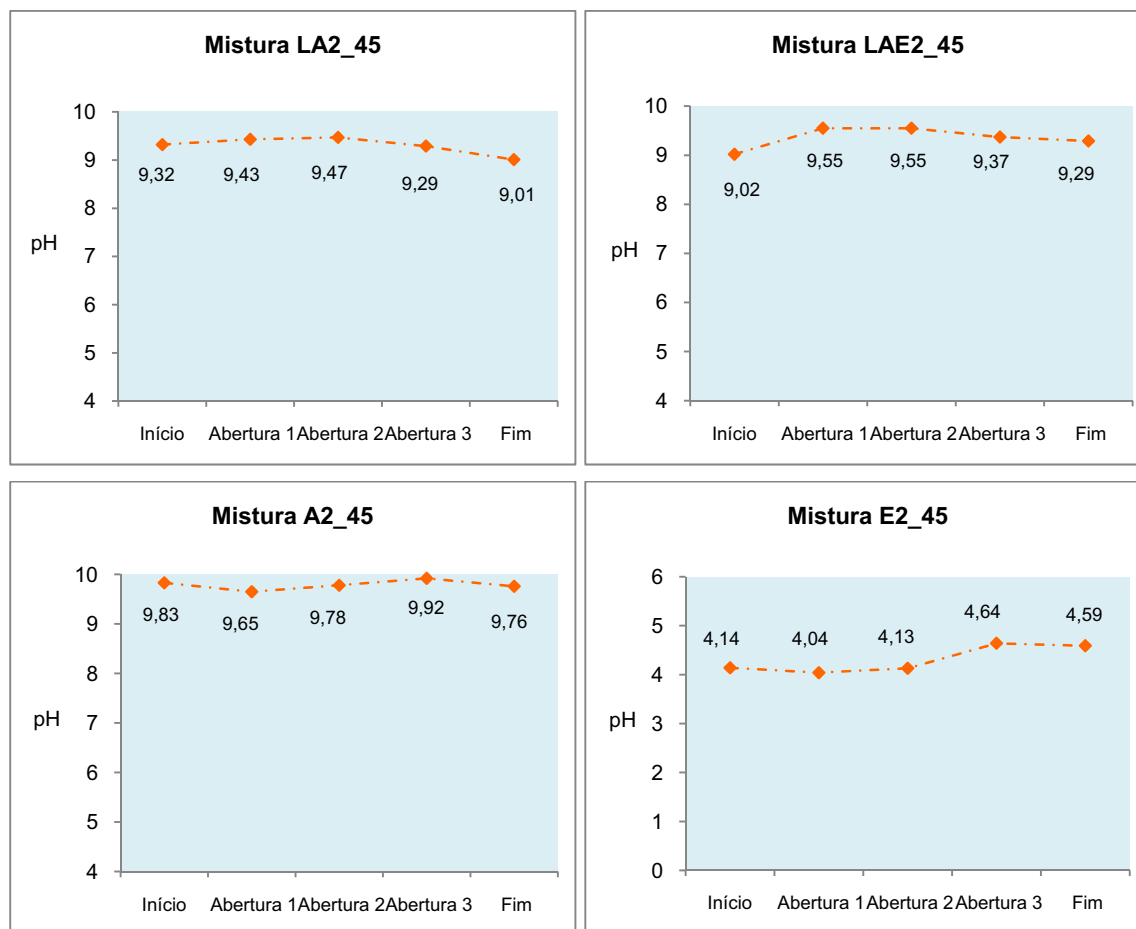


Figura 2.26: Evolução do pH nas misturas LA2\_45, LAE2\_45, no resíduo de aviário, A2\_45, e no engaço, E2\_45.

### 2.3.6. Características da purga

A figura 2.27 apresenta o volume recolhido e o carácter químico da purga libertada pelas misturas LA1\_45, LAE1\_45.

Apesar das oscilações observadas em LA1\_45, tanto LA1\_45 como LAE1\_45 revelam tendência decrescente, no que diz respeito ao volume de purga recolhida.

Quanto ao carácter químico, as purgas, recolhidas em ambas as misturas, LA1\_45 e LAE1\_45 apresentam inicialmente carácter neutro que vai evoluindo progressivamente, no sentido da basicidade, até estabilizar em valores pH próximos de 9.

Os volumes totais recolhidos foram 610 ml e 662 ml respectivamente para LA1\_45 e LAE1\_45. Verifica-se portanto que a presença de engaço promove a formação e escorrência da purga.

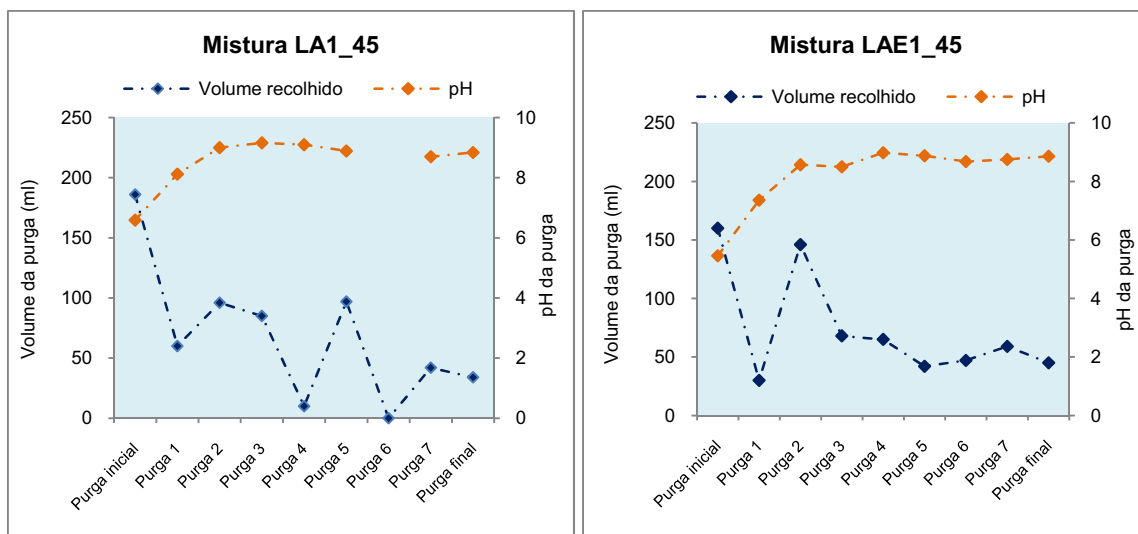


Figura 2.27: Volume recolhido e o carácter químico da purga produzida nas misturas LA1\_45 e LAE1\_45

A figura 2.28 apresenta o volume recolhido e o carácter químico da purga libertada pelas misturas LA1\_55 e LAE1\_55.

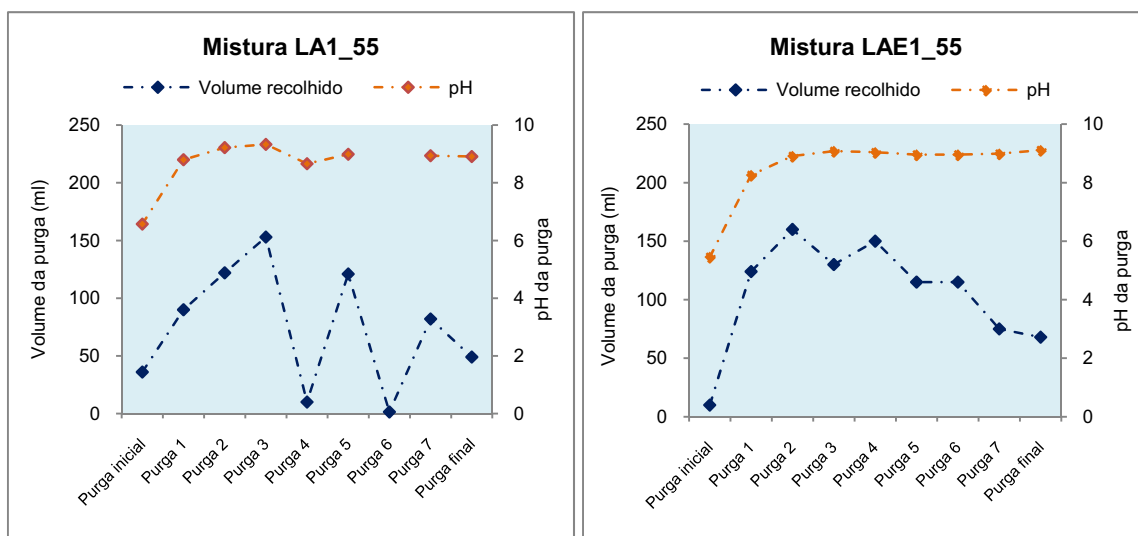


Figura 2.28: Volume recolhido e o carácter químico da purga produzida nas misturas LA1\_55 e LAE1\_55.

O volume da purga recolhido em LA1\_55, aumenta da purga 1 à purga 4. Daí em diante, até ao final do ensaio, apesar das oscilações bruscas, observa-se uma tendência de diminuição no volume recolhido.

Em LAE1\_55, o volume de purga recolhido oscila, bruscamente, até à purga 3. Daí em diante, observa-se também uma diminuição clara do volume de purga recolhido.

Quanto ao carácter químico, ambas as misturas, LA1\_55 e LAE1\_55, inicialmente, originam purgas com carácter ligeiramente ácido. Ao longo do ensaio, o pH evolui no sentido da basicidade.

Os volumes totais recolhidos foram 664 ml e 947 ml respectivamente para LA1\_55 e LAE1\_55. Também a 55°C, a presença de engajo promove a formação e escorrência da purga.

A figura 2.29. apresenta o volume recolhido e o carácter químico da purga libertada pelas misturas LA2\_45, LAE2\_45.

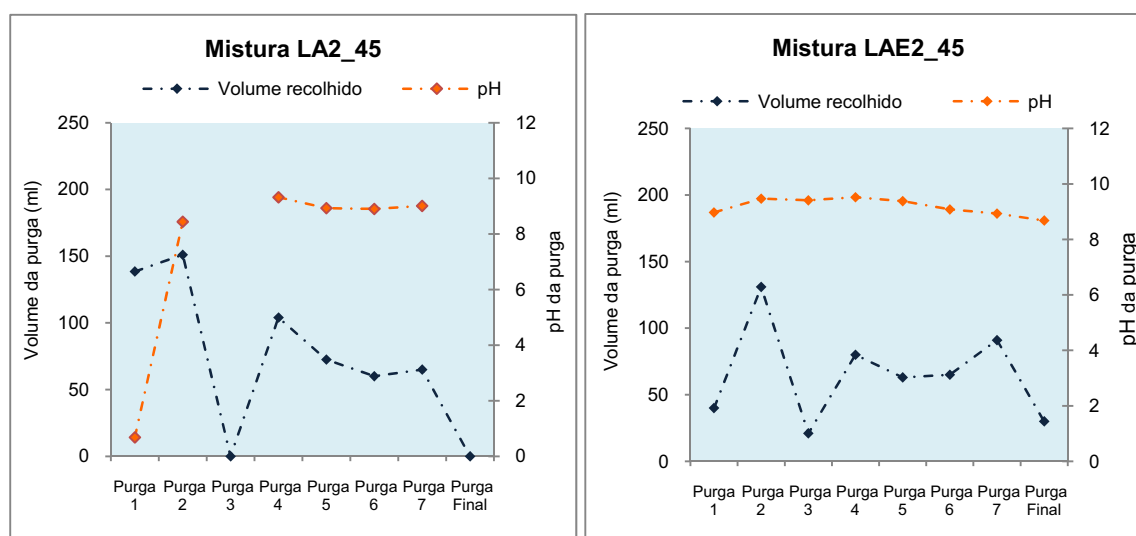


Figura 2.29: Volume recolhido e o carácter químico da purga produzida nas misturas LA2\_45 e LAE2\_45.

Da análise da figura 2.29 constata-se que as purga recolhidas em LA2\_45 e em LAE2\_45, apresentam, quanto ao volume recolhido e ao carácter químico, comportamentos semelhantes.

Em ambas as misturas, entre as aberturas 1 e 2, o volume de purga recolhido apresenta tendência de crescimento, mais notória em LAE2\_45. Na abertura 3, observa-se uma diminuição acentuada.

Da abertura 4 à abertura 6, observa-se uma redução no volume da purga e na abertura 7, novo aumento seguido de nova diminuição na abertura final.

Os volumes totais de purga recolhida foram 665,5 ml e 558 ml, respectivamente, para as misturas LA2\_45 e LAE2\_45.

No que diz respeito ao carácter químico as purgas de ambas as misturas, LA2\_45 e LAE2\_45, são alcalinas. De referir ainda que, durante as aberturas efectuadas neste

ensaio e mediante análise visual, foi adicionado, a estas misturas, um volume de água de, 350 ml e 400 ml, respectivamente, para repor humidade.

A figura 2.30. apresenta o volume recolhido e o carácter químico da purga libertada pelo resíduo de aviário e pelo engaço.

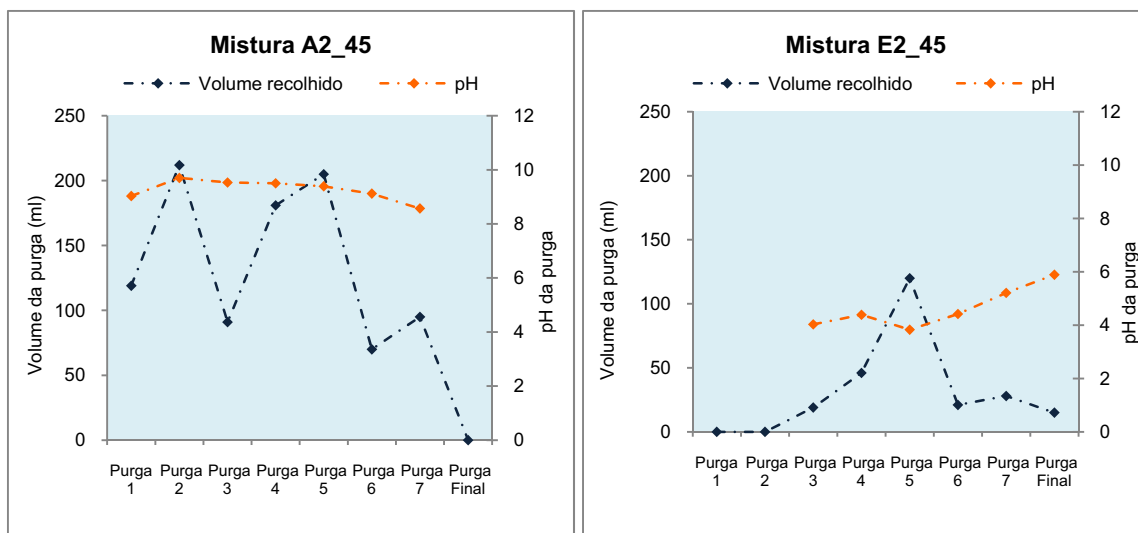


Figura 2.30: Volume recolhido e o carácter químico da purga produzida no resíduo de aviário, A2\_45, e no engaço, E2\_45.

Em relação à degradação do resíduo de aviário, A2\_45, verificam-se, à excepção do que sucede no período entre a purga 4 e 5 e entre a purga 6 e 7, flutuações significativas do volume recolhido, ao longo do ensaio. O volume total de purga recolhido na degradação deste resíduo foi de 1034 ml. Em relação ao carácter alcalino, apesar da tendência decrescente, os valores de pH mantêm-se no intervalo, compreendido entre 8 e 10.

Quanto á degradação do engaço, o volume total de purga recolhida foi de 272 ml. No entanto, à excepção do que sucede na purga 5, verifica-se que, ao longo de todo o ensaio, o volume de purga recolhida é pouco significativo, e apresenta carácter, vincadamente, ácido, o que seria expectável atendendo à acidez do próprio resíduo.

Refira-se que, durante as aberturas efectuadas neste ensaio, mediante análise visual, foi adicionado ao resíduo de aviário um volume de água de 600ml e ao engaço um volume de água de 470 ml, para repor a humidade.

### 2.3.7. Teor de CO<sub>2</sub> nos gases de compostagem

A figura 2.31 refere-se ao teor de CO<sub>2</sub> libertado pelas misturas LA1\_45, LA1\_55, LAE1\_45, LAE1\_55, quando sujeitas a um caudal de ar fixo. Relembra-se que, as 4

aberturas, dos reactores, ocorreram, respectivamente, após 2 dias (48 horas), 6 dias (114 horas), 15 dias (360 horas) e 21 dias (504 horas) de degradação dos substratos dentro dos reactores.

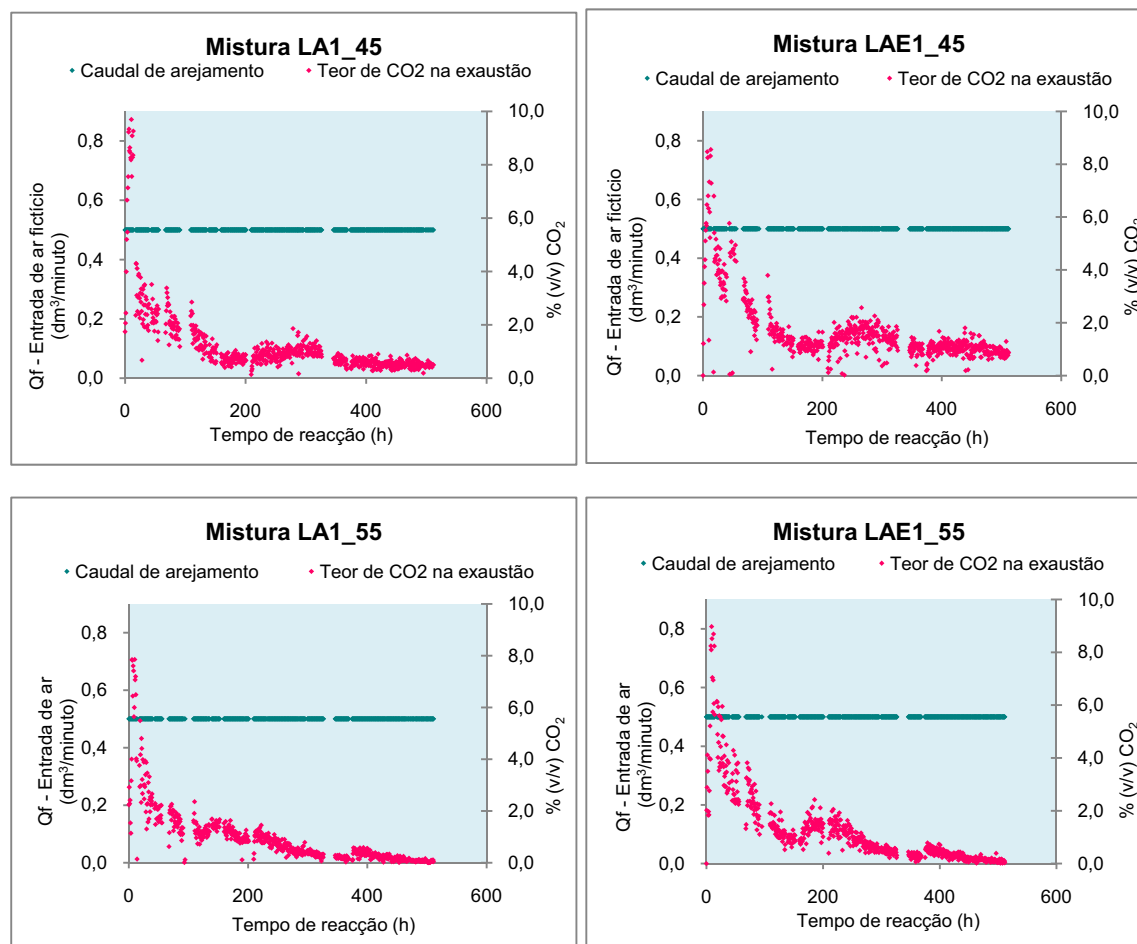


Figura 2.31: Teor de CO<sub>2</sub> libertado pelas misturas LA1\_45, LAE1\_45, LA1\_55 e LAE1\_55 em comparação com caudal de ar fixo e teoricamente estabelecido para satisfazer as necessidades de ar estequiométrico da reacção.

Tanto para a mistura LA1\_45 como para a mistura LA1\_55, durante as primeiras 48 horas de reacção, até à 1ª abertura dos reactores, registaram-se valores elevados de CO<sub>2</sub> libertado, que decrescem, de forma mais acentuada, em LA1\_55.

No período entre a abertura 1 e 2 dos reactores (114 h), verifica-se, novamente, em ambas as misturas, um ligeiro aumento da libertação de CO<sub>2</sub>, mais evidente em LA1\_45, seguido de novo decréscimo, novamente mais acentuado em LA1\_55. Entre a abertura 2 e 3 dos reactores (360 h), LA1\_45, ao contrário de LA1\_55, regista um aumento na produção de CO<sub>2</sub>.

Da abertura 3 até ao final do ensaio, a produção de  $\text{CO}_2$ , nas misturas LA1\_45, e LA1\_55 mantém a tendência decrescente. Apesar do volume de  $\text{CO}_2$  libertado pelas misturas com engaço, LAE\_45 e LAE\_55, ser superior ao libertado pelas misturas sem engaço, o seu comportamento é semelhante

A figura 2.32. indica a evolução do teor de  $\text{CO}_2$  libertado pelas misturas LA2\_45, LAE2\_45, bem como pelo resíduo de aviário, A2\_45, e pelo engaço, E2\_45, quando sujeitas a um caudal de ar pré-definido.

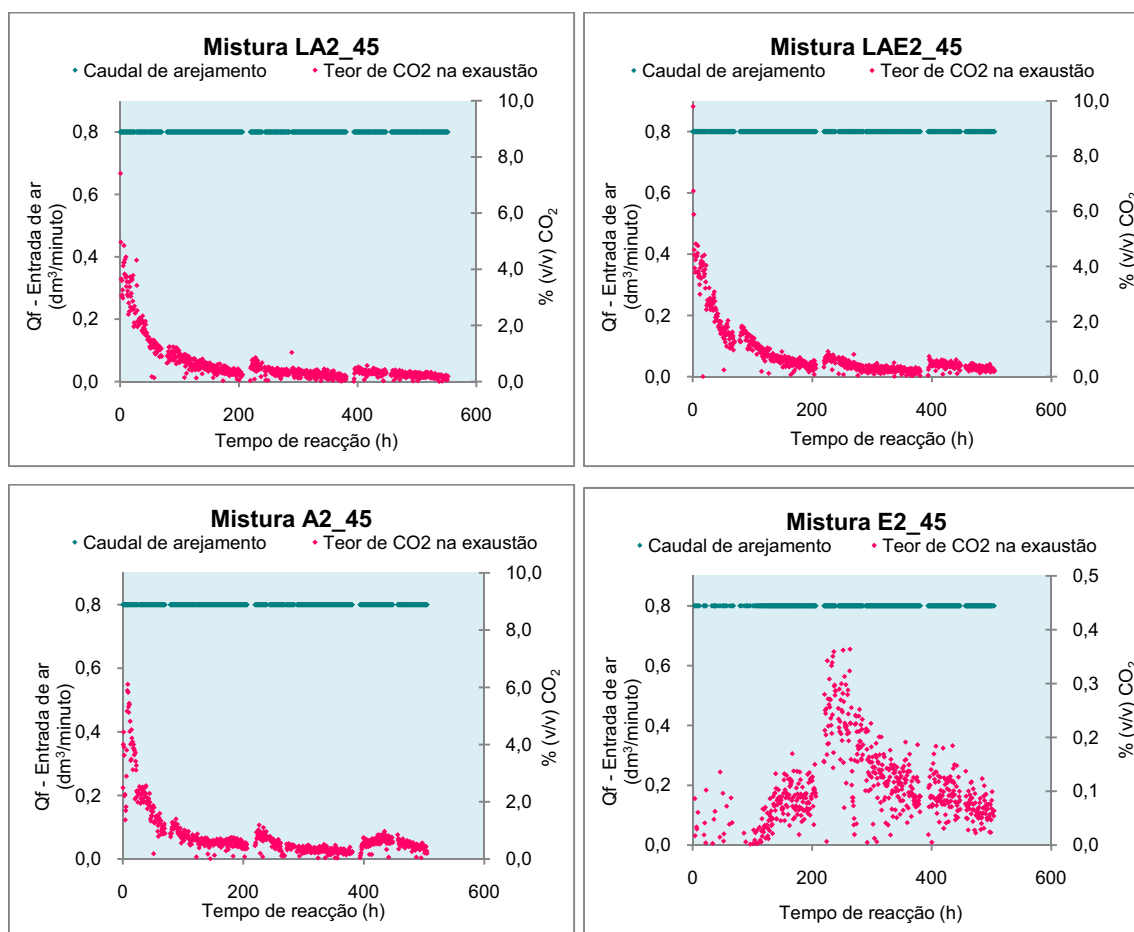


Figura 2.32: Teor de  $\text{CO}_2$  libertado pelas misturas LA2\_45, LAE2\_45, pelo resíduo de aviário, A2\_45, e pelo engaço, E2\_45, em comparação com caudal de ar fixo e teoricamente estabelecido para satisfazer as necessidades de ar estequiométrico da reacção.

O comportamento de ambas as misturas, LA2\_45 e LAE2\_45, no que se refere à libertação de  $\text{CO}_2$ , é semelhante. Verificam-se, após cada uma das 4 aberturas, ligeiros aumentos, picos, na produção de  $\text{CO}_2$ , logo seguidos por decréscimos progressivos.

Também no que se refere à degradação do resíduo de aviário, se pode observar que o  $\text{CO}_2$  produzido acompanha o comportamento das misturas anteriores.

Na degradação do engaço, E2\_45, é notória a reduzida produção de  $\text{CO}_2$ . Apesar de reduzida e lenta, a presença do engaço será, provavelmente, co-responsável por um suave aumento da produção  $\text{CO}_2$ , das misturas, nomeadamente, nos picos que se observam após a abertura dos reactores.

A figura 2.33 apresenta o teor de  $\text{CO}_2$  libertado pelas misturas LA1\_45, LA1\_55, LAE1\_45, LAE1\_55, em contraponto com o caudal de ar efectivamente fornecido, para satisfazer as necessidades de ar, ao longo do processo, isto é, em contraponto com o caudal actual.

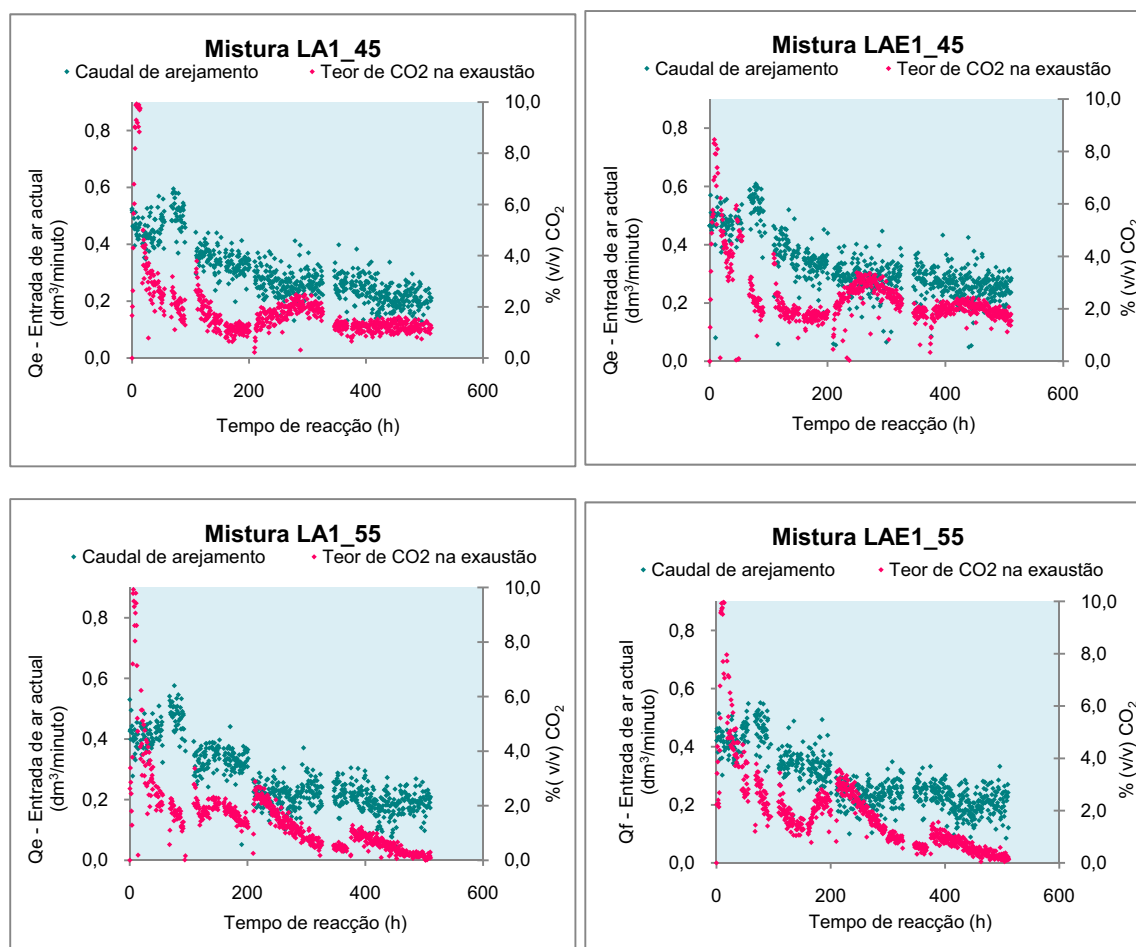


Figura 2.33: Teor de  $\text{CO}_2$  libertado pelas misturas LA1\_45, LAE1\_45, LA1\_55 e LAE1\_55 em comparação com caudal de ar efectivamente fornecido para satisfazer as necessidades de ar estequiométrico da reacção.

O caudal de ar actual estabelecido resulta de ajustes manuais nos rotâmetros. Estes ajustes relacionam-se com o equilíbrio entre as necessidades de ar e a humidade das misturas, daí que fossem efectuados após a abertura dos reactores e a análise da humidade das misturas.

A observação desta figura reforça a análise efectuada na figura 2.31. No gás de exaustão, o destaque com que surgem os picos de  $\text{CO}_2$  (aparentam ter amplitude superior à observada na figura 2.31), relaciona-se com os patamares de caudal actual de alimentação fornecidos, sucessivamente, menores, ao longo do ensaio.

À excepção dos picos iniciais (durante as primeiras 48 h) em que o teor de  $\text{CO}_2$  no gás de exaustão atinge 10%, é possível acreditar que o fornecimento de  $\text{O}_2$  nunca constituiu um factor limitativo ao desenvolvimento da reacção, durante os ensaios.

A figura 2.34. indica a evolução do teor de  $\text{CO}_2$  libertado pelas misturas LA2\_45, LAE2\_45, pelo resíduo de aviário, A2\_45, e pelo engaço, E1\_45, quando sujeitas ao caudal de ar actual.

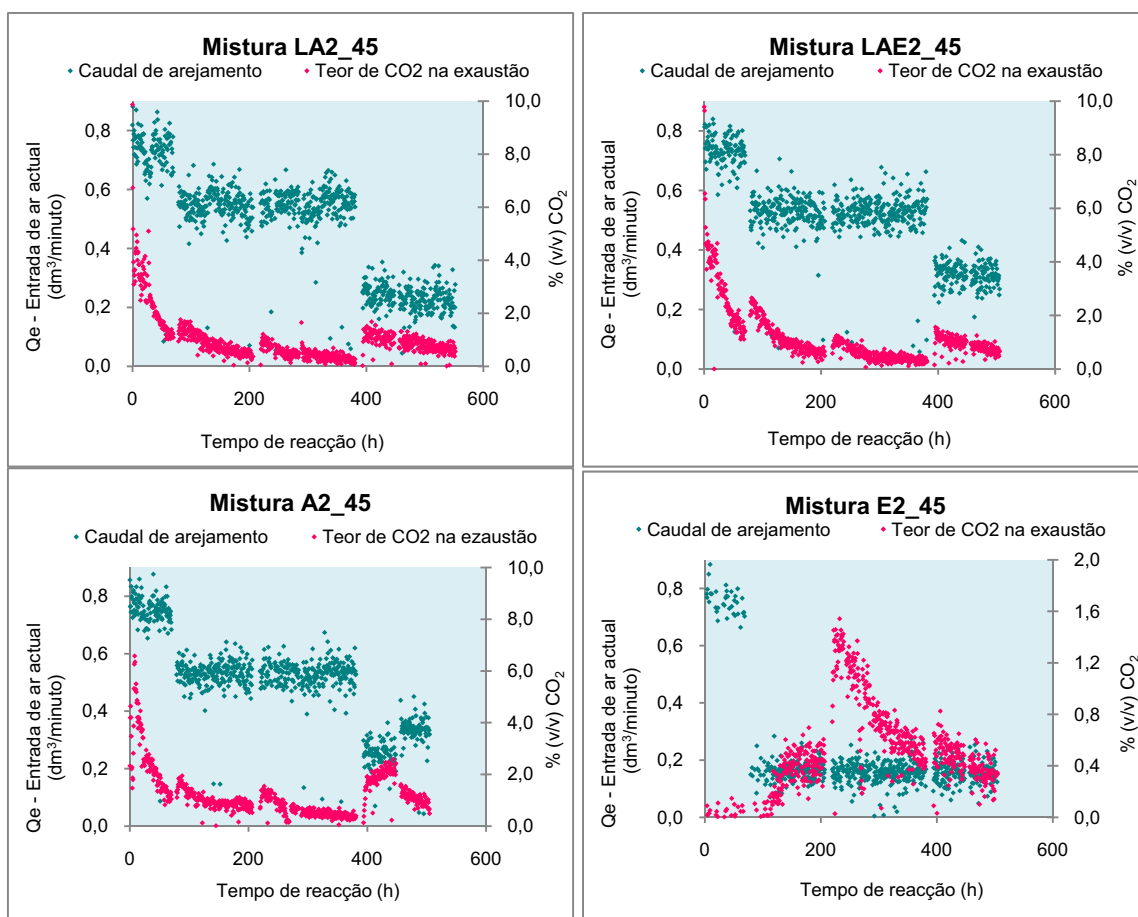


Figura 2.34: Teor de  $\text{CO}_2$  libertado pelas misturas LA2\_45, LAE2\_45, pelo resíduo de aviário, A2\_45, e pelo engaço, E2\_45, em comparação com caudal de ar efectivamente fornecido para satisfazer as necessidades de ar estequiométrico da reacção.

Recorde-se que, este caudal de ar actual foi manualmente ajustado abertura a abertura consoante a humidade das misturas e dos substratos em degradação.



A observação desta figura reforça a análise efectuada à figura 2.32, permite observar, na última fase de degradação do resíduo de aviário, um pico de produção de  $\text{CO}_2$  e visualizar, de uma forma mais clara, a diminuta libertação de  $\text{CO}_2$  resultante da degradação do engaço.

### 2.3.8. $\text{CO}_2$ gerado e acumulado

O cálculo do volume de  $\text{CO}_2$  libertado ao longo do processo pode ser realizado através da equação 2.7, assumindo que é gerada uma mole de  $\text{CO}_2$  por cada mole de oxigénio consumida,

$$V_{\text{CO}_2} = \sum_{i=1}^n \frac{(y_{\text{CO}_2 n-1} \cdot Q_{e n-1} + y_{\text{CO}_2 n} \cdot Q_{e n})}{2} (t_n - t_{n-1}) \quad [\text{dm}^3 \text{PTN}] \quad \text{Eq: 2.7}$$

A figura 2.35 permite percepção o volume de  $\text{CO}_2$  gerado e acumulado, ao longo de todo o ensaio, para as misturas em estudo.

É notório que, em qualquer uma das 4 aberturas, a mistura LA1\_45 apresenta um volume de  $\text{CO}_2$  acumulado superior ao valor apresentado pela mistura LA1\_55.

Também a mistura LAE1\_45 apresenta volume de  $\text{CO}_2$  acumulado superior ao observado em LAE1\_55.

Torna-se evidente que a presença do engaço, tanto a  $45^\circ\text{C}$  como a  $55^\circ\text{C}$  proporciona, uma maior produção de  $\text{CO}_2$ .

Se a degradação ocorrer a  $45^\circ\text{C}$ , parecem estar reunidas condições óptimas para a produção máxima de  $\text{CO}_2$ .

---

<sup>6</sup>  $y_{\text{CO}_2}$ , fracção molar do  $\text{CO}_2$  no ar seco de exaustão;  $Q_a$ , caudal actual do ar seco de entrada ( $\text{dm}^3 \text{PTN}/\text{min}$ );  $t$ , tempo de reacção (min);  $n$ , instante em que se efectua a leitura dos parâmetros

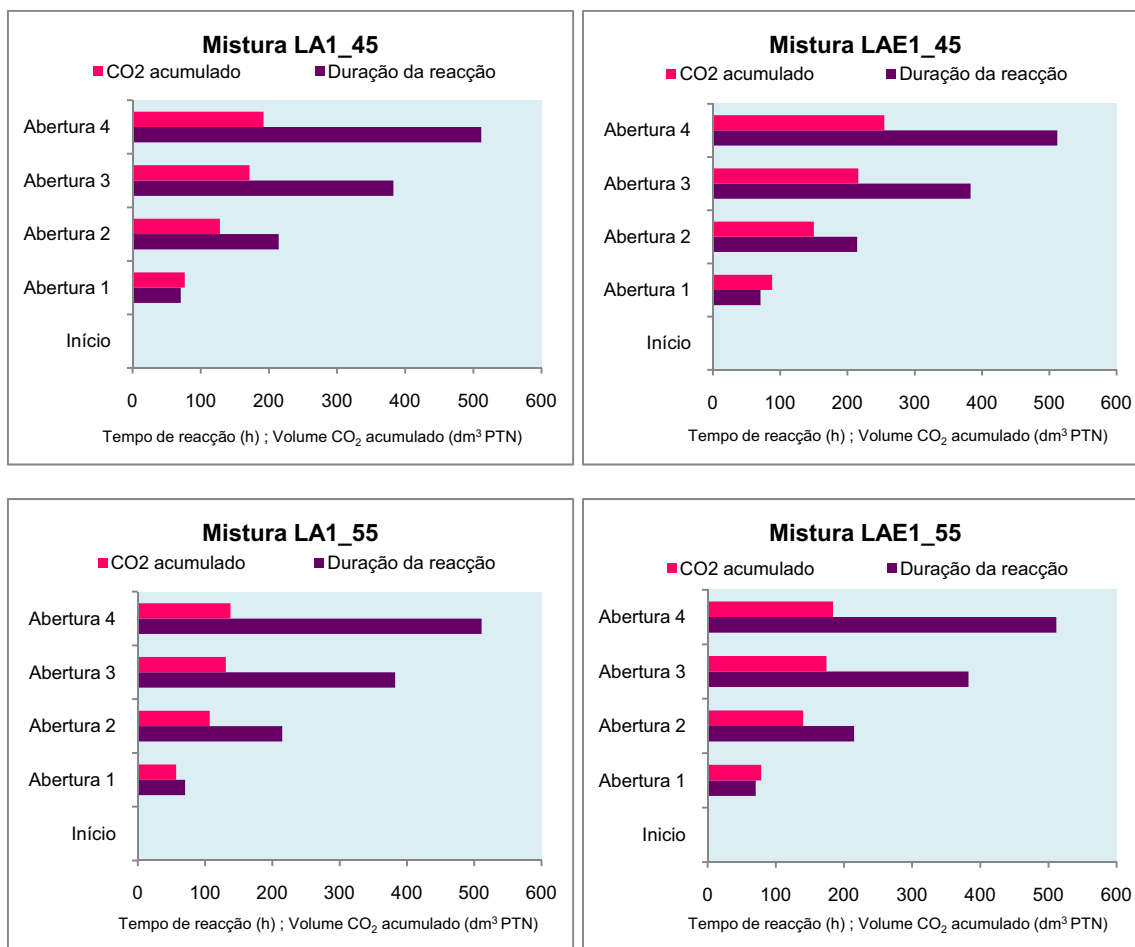


Figura 2.35: Volume de CO<sub>2</sub> acumulado durante a reacção das misturas LA1\_45, LAE1\_45, LA1\_55 e LAE1\_55.

A figura 2.36 permite perceber o volume de CO<sub>2</sub> recolhido e acumulado, ao longo de todo o ensaio, para as misturas LA2\_45, LAE2\_45, pelo resíduo de aviário, A2\_45, e pelo engaço, E1\_45.

É possível constatar, em relação a LA2\_45 e LAE2\_45 que, em todas as aberturas efectuadas, o volume de CO<sub>2</sub> acumulado é superior em LAE2\_45.

No que se refere à degradação do resíduo de aviário e do engaço, o volume de CO<sub>2</sub> recolhido e acumulado, em A2\_45, é muito superior ao recolhido e acumulado em E2\_45.

Mesmo que ligeira, a contribuição do engaço parece permitir que, durante todo o ensaio, LAE2\_45 produza um volume de CO<sub>2</sub> superior ao de LA2\_45.

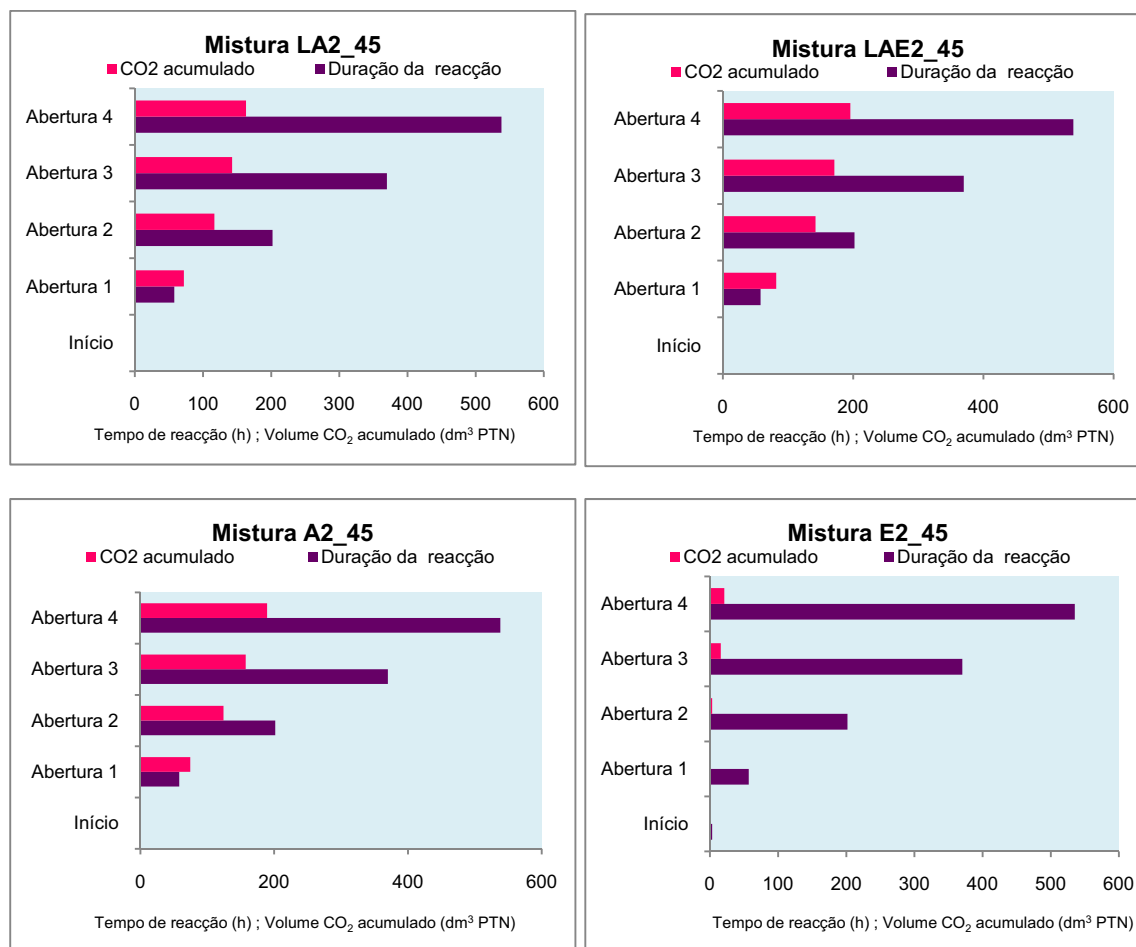


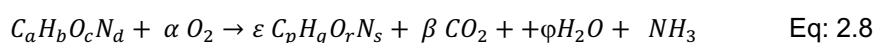
Figura 2.36: Volume de CO<sub>2</sub> acumulado durante a reacção das misturas LA2\_45, LAE2\_45, do resíduo de aviário, A2\_45, e do engaço, E2\_45.

### 2.3.9. Estequiometria

O processo de compostagem pode ser descrito através da equação química 2.7, e pressupõe o conhecimento do parâmetro rendimento molar da reacção.

O rendimento molar da reacção pode ser determinado pela equação 2.8, desde que, seja conhecido o rendimento mássico do processo, isto é, o quociente entre massa de SV de composto e a massa de SV de substrato inicial.

No entanto, não sendo conhecida a composição elementar do composto, não é possível conhecer o rendimento molar do processo. Nestas condições, assume-se que, a composição elementar da matéria orgânica é idêntica, no resíduo e no composto, e que o processo de compostagem se pode descrever, recorrendo à equação química simplificada que a seguir se apresenta.



$$\epsilon = \frac{\text{mol de SV de composto}}{\text{mol de SV de substrato}} = \frac{\text{massa de SV de composto}}{\text{massa de SV de substrato}} \frac{M_{(\text{substrato})}}{M_{(\text{composto})}} \quad \text{Eq: 2.9}$$

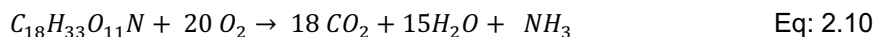
As tabelas 2.8 e 2.9 dizem respeito ao cálculo da fórmula empírica da matéria orgânica para o resíduo de aviário e para a lama, respectivamente.

A fórmula empírica do substrato em degradação e a estequiometria da reacção podem ser estimadas através do conhecimento da composição elementar, de cada um dos componentes das misturas em estudo, tal como referenciado na tabela 2.4.

Tabela 2.8: Cálculo dos coeficientes da fórmula empírica da matéria orgânica do resíduo de aviário.

Elemento químico	Fracção mássica/Massa molar	Coefficiente estequiométrico
<b>Azoto, N</b>	0,00231	d =1
<b>Carbono, C</b>	0,04048	a =18
<b>Hidrogénio, H</b>	0,07643	b =33
<b>Oxigénio, O</b>	0,02534	c =11

De seguida a equação 2.10 descreve a reacção de degradação do resíduo de aviário e a equação 2.11, o cálculo do coeficiente de degradação, isto é, a estequiometria do processo, correspondente à massa de SV degradados por cada  $\text{dm}^3$  de  $\text{CO}_2$ , em condições PTN, para gás perfeito.



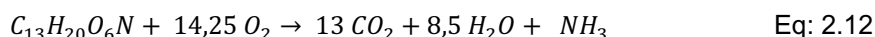
$$M(C_{18}H_{33}O_{11}N) = 439 \text{ g/mol}$$

$$\gamma = \frac{M(C_aH_bO_cN_d)}{17 \times 22,4} = 1,089 \frac{\text{g SV}}{\text{dm}^3 CO_2} \quad \text{Eq: 2.11}$$

Tabela 2.9: Cálculo dos coeficientes da fórmula empírica da matéria orgânica da lama.

Elemento químico	Fracção mássica/Massa molar	Coefficiente estequiométrico
<b>Azoto, N</b>	0,00350	1
<b>Carbono, C</b>	0,04349	13
<b>Hidrogénio, H</b>	0,07117	20
<b>Oxigénio, O</b>	0,02237	6

À semelhança do anteriormente referido para o resíduo de aviário, as equações 2.11 e 2.12 descrevem a degradação da lama e o respectivo coeficiente de degradação, em condições PTN, para gás perfeito.



$$M(C_{13}H_{20}O_6N) = 287 \text{ g/mol}$$

$$\gamma = \frac{M(C_aH_bO_cN_d)}{17 \times 22,4} = 1,024 \frac{\text{g SV}}{\text{dm}^3 CO_2} \quad \text{Eq: 2.13}$$

Não obstante a presença de engaço, em algumas das misturas em estudo, recorde-se que, maioritariamente, as misturas são constituídas por resíduo de aviário e lama secundária de ETAR de celulose.

O engaço presente nas misturas, em cerca de 10%, actua como agente poroso/estruturante sem, no entanto, alterar significativamente a proporção relativa dos principais componentes das misturas.

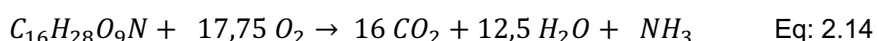
De salientar que, ao contrario do que sucedeu com o resíduo de aviário ou com a lama, não se conhece a análise elementar do engaço.

Os dados apresentados na tabela 2.10 dizem respeito ao cálculo da fórmula empírica da matéria orgânica (resíduo de aviário e da lama) presente na mistura 1.

Tabela 2.10: Cálculo dos coeficientes da fórmula empírica da matéria orgânica da mistura 1.

<b>Mistura 1 - Lama (30%); Aviário (70%) -</b>			
<b>Elemento químico</b>	<b>Base seca sem cinzas (bssc)</b>	<b>Fracção mássica/Massa molar</b>	<b>Coeficiente estequiométrico</b>
<b>Azoto, N</b>	0,03738	0,00267	1
<b>Carbono, C</b>	0,4966	0,04138	16
<b>Hidrogénio, H</b>	0,0749	0,0785	28
<b>Oxigénio, O</b>	0,3912	0,02445	9

Através das equações 2.13 e 2.14 obtém-se um coeficiente de degradação de aproximadamente 1,08 g SV/ dm<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub> (PTN).



$$M(C_{16}H_{28}O_9N) = 375 \text{ g/mol}$$

$$\gamma = \frac{M(C_aH_bO_cN_d)}{17 \times 22,4} = 1,081 \frac{\text{g SV}}{\text{dm}^3 \text{ CO}_2} \quad \text{Eq: 2.15}$$

O valor estimado pela eq. 2.14 pode ser comparado com o calculado com base nos resultados experimentais, obtidos em cada ensaio, e determinado recorrendo à relação entre a massa de SV gaseificados e o volume de CO<sub>2</sub> libertado - uma relação linear cujo declive representa o coeficiente de degradação ou estequiometria do processo (Batch,1984).

A relação acima referenciada, para o ensaio 1 que operou com a mistura 1, é apresentada na figura 2.37.

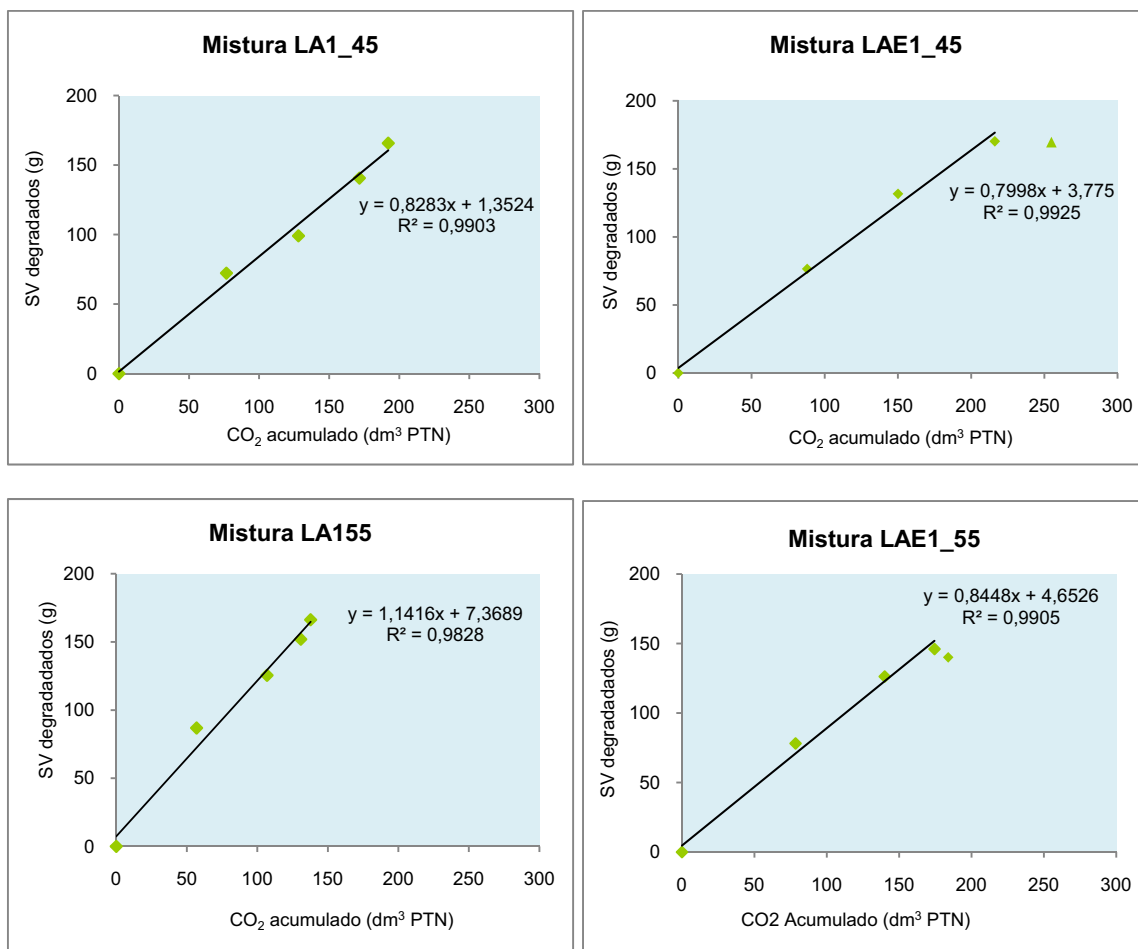


Figura 2.37: Relação entre a massa de sólidos voláteis gaseificados e o volume de CO<sub>2</sub> libertado pelas misturas LA1\_45, LAE1\_45, LA1\_55 e LAE1\_55.

Obtém-se assim, graficamente, uma gama de valores entre 0,8 e 1,14 g.SV/dm<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub> para o coeficiente estequiométrico. Este intervalo inclui o valor estimado pelas equações 2.13. e 2.14.

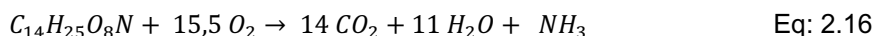
Ao valor médio de 0,90 encontra-se associado um coeficiente de variação de 18%, parcialmente, justificado com as incertezas associadas aos vários procedimentos de análise efectuados.

Os dados apresentados na tabela 2.11 dizem respeito ao cálculo da fórmula empírica da matéria orgânica (resíduo de aviário e da lama) na mistura 2.

Tabela 2.11: Cálculo dos coeficientes da fórmula empírica da matéria orgânica na mistura 2.

Mistura 2 - Lama (58%); Aviário (42%) -			
Elemento químico	Base seca sem cinzas (bssc)	Fracção molar/Massa molar	Coefficiente estequiométrico
Azoto, N	0,04205	0,00300	1
Carbono, C	0,50668	0,04222	14
Hidrogénio, H	0,07338	0,07338	25
Oxigénio, O	0,37789	0,02362	8

Em relação ao ensaio 2 assumem-se pressupostos idênticos aos do ensaio 1, no que diz respeito tanto à composição elementar do material inicial e do composto final, equação 2.15, como à determinação do coeficiente de degradação, equação 2.16, que desta feita atinge um valor de 1,06 g SV/ dm<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub> PTN, ligeiramente distante do intervalo de valores experimentais determinados na figura 2.38 para LA2\_45 e LAE2\_45.



$$M(C_{14}H_{25}O_8N) = 334 \text{ g/mol}$$

$$\gamma = \frac{M(C_a H_b O_c N_d)}{16 \times 22,4} = 1,058 \quad \frac{\text{g SV}}{\text{dm}^3 \text{ CO}_2} \quad \text{Eq: 2.17}$$

A figura 2.38 representa a estequiometria do processo, determinada através dos resultados experimentais e da relação entre a massa de sólidos voláteis gaseificados e o volume de CO<sub>2</sub> libertado, tanto por LA2\_45 e LAE2\_45, como por A2\_45 e E2\_45.

O coeficiente estequiométrico das misturas LA2\_45 e LAE2\_45 é da mesma ordem de grandeza dos obtidos no ensaio 1, para as misturas LA1\_45 e LAE1\_45, e semelhante ao determinado para a degradação do resíduo de aviário.

Em relação A2\_45, apesar do considerável afastamento de 26 %, o coeficiente de degradação é comparável ao estimado na eq. 2.11.

No caso do engaço, os resultados experimentais não permitiram obter uma boa correlação entre os sólidos voláteis degradados e o volume de CO<sub>2</sub> gerado durante a degradação, o que pode ser, parcialmente, justificado pela incerteza resultante da reduzida degradação deste substrato.

Tanto no ensaio 1 como no ensaio 2, as misturas que contém engaço apresentam, na última amostragem, um desvio significativo em relação à tendência, até então observada, pelo que, o resultado obtido nessa amostragem não foi considerado para a determinação da linha de tendência e do respectivo coeficiente de degradação.

Este desvio poderá ser consequência da sobreposição da amplitude dos erros sistemáticos em relação à amplitude da variação dos parâmetros, sobre os quais assenta o cálculo do coeficiente de degradação.

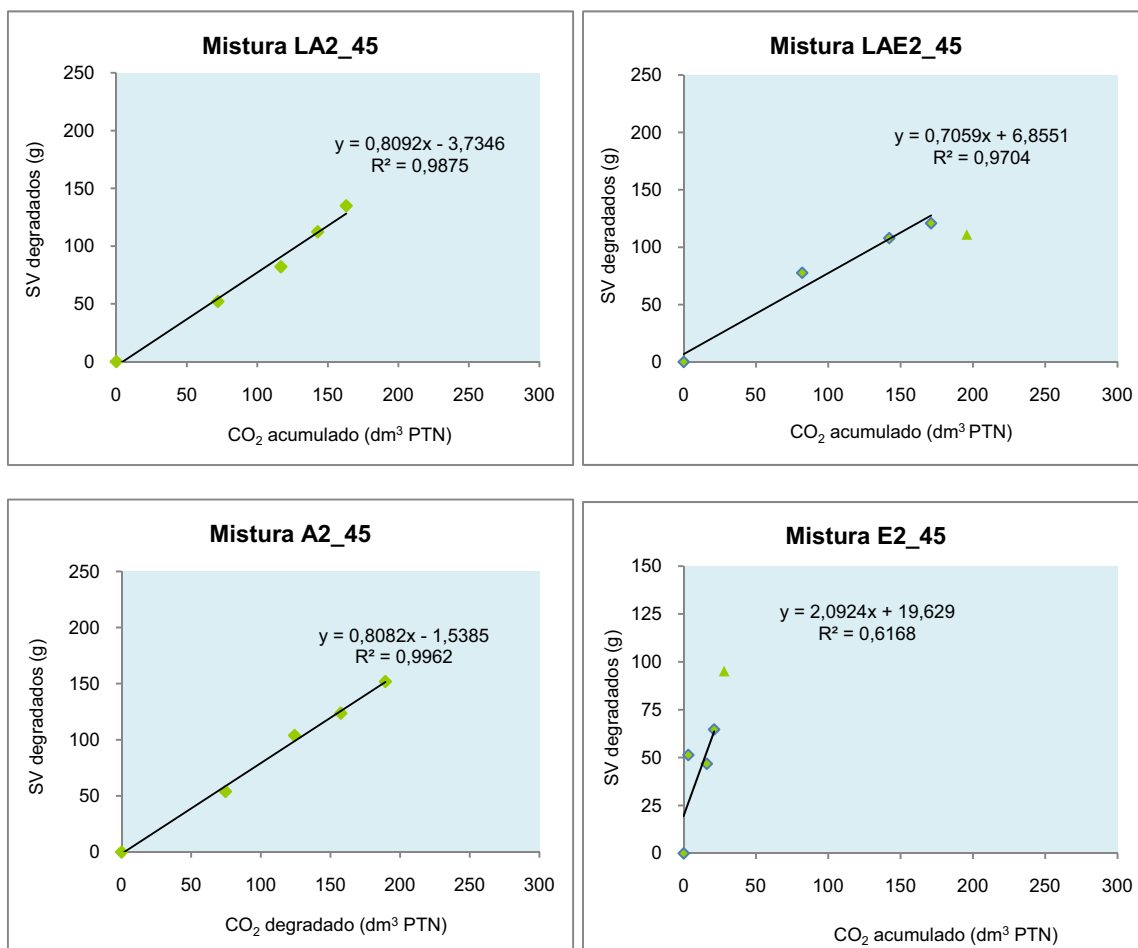


Figura 2.38: Relação entre a massa de sólidos voláteis gaseificados e o volume de CO<sub>2</sub> libertado pelas misturas LA2\_45, LAE2\_45, pelo resíduo de aviário, A2\_45, e pelo engaço, E2\_45.

### 2.3.10. Velocidade da reacção

Em ambos os ensaios, a velocidade de degradação instantânea dos substratos é determinada recorrendo ao cálculo da derivada da curva do volume de CO<sub>2</sub> acumulado, produzido por cada uma das misturas e substratos em estudo, e à aplicação da equação 2.17. Considera-se que o gás biológico se comporta como um gás perfeito em condições PTN.



$$r_{CO_2} = \frac{\delta CO_2}{\delta t} \times \frac{44}{22,4} \times \frac{1}{M_{sv}} \left[ \frac{mg_{CO_2}}{g_{sv} \cdot h} \right] \quad \text{Eq: 2.18}$$

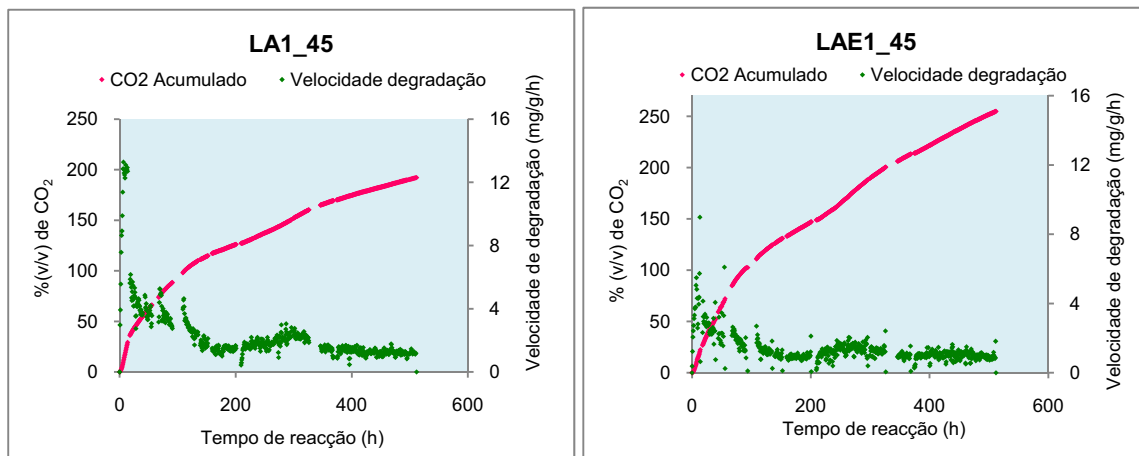
A figura 2.39 relaciona o volume de CO<sub>2</sub> produzido pelas misturas e substratos em degradação, nos ensaios 1 e 2, pelo resíduo de aviário, A2\_45 e pelo engaço, E2\_45 com as respectivas velocidades de degradação.

Os valores mais elevados na produção de CO<sub>2</sub>, observam-se através do declive máximo da curva e coincidem com a velocidade de degradação máxima. Quando comparados, os valores da velocidade específica de produção de CO<sub>2</sub>, é em LAE2\_45 que se observa o valor mais elevado.

A velocidade específica de produção de CO<sub>2</sub> do resíduo de aviário, A2\_45, é muito superior à do engaço, E2\_45 e semelhante à das misturas LA2\_45 e LAE2\_45.

Pode concluir-se que, nas misturas LAE, o engaço se comporta somente como um agente estruturante, uma vez que apresenta uma degradação pouco significativa, aproximadamente 14%. Facto que pode ser interpretado como resultado da inactivação dos microrganismos no ambiente ácido proporcionado pelo engaço.

Globalmente observa-se que, durante todo o processo, à temperatura de 45°C, a velocidade específica de produção de CO<sub>2</sub> atinge valores mais elevados, no início do processo.



<sup>7</sup> Derivada de  $y_n$  em  $x_n$  com base nos pontos  $y_{n-1}$  e  $y_{n+1}$  e nos intervalos da variável independente  $h_1 = x_n - x_{n-1}$  e  $h_2 = x_{n+1} - x_n$

$$\text{dada por } y'_n = \frac{h_1^2 y_{n+1} + (h_2^2 - h_1^2) y_n - h_2^2 y_{n-1}}{h_1 h_2 (h_1 + h_2)}$$

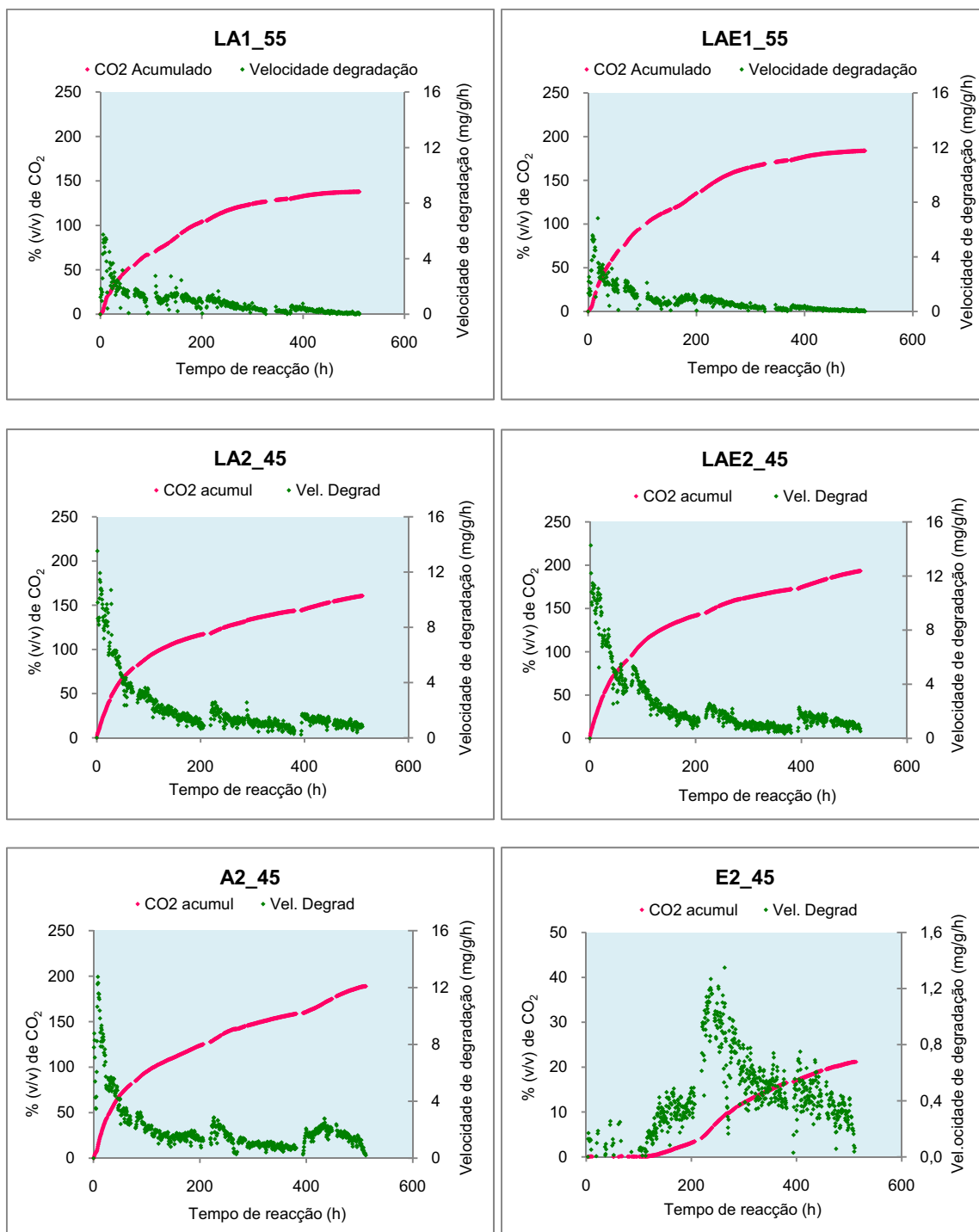


Figura 2.39: Comparação entre o volume de CO<sub>2</sub> acumulado e a velocidade de degradação das misturas e dos substratos em estudo, nos ensaios 1 e 2.

Na figura 2.40 comparam-se os volumes de CO<sub>2</sub> acumulados, pelas misturas e pelos resíduos em degradação, durante todo o ensaio.

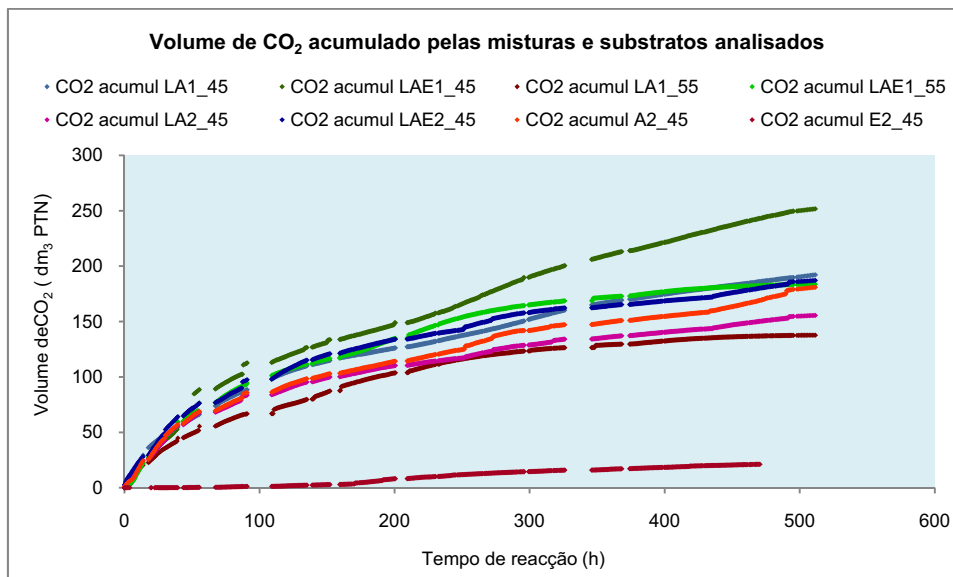


Figura 2.40: Volume de CO<sub>2</sub> acumulado pelas misturas e substratos em estudo, nos ensaios 1 e 2.

Da observação da figura 2.40, destaca-se a mistura LAE1\_45 como aquela que registra um maior volume de CO<sub>2</sub> cumulado. LAE1\_55, LA1\_45, LAE2\_45 e A2\_45, não registam, entre si, diferenças significativas. LA2\_45 e LA1\_55, apresentam volumes de CO<sub>2</sub> acumulado inferiores aos observados nas outras misturas, mas muito superiores ao volume de CO<sub>2</sub> acumulado em E2\_45.

A figura 2.41 apresenta, simultaneamente, o grau de conversão de SV médio e o volume de CO<sub>2</sub> acumulado, por todos os substratos em estudo, nos dois ensaios realizados neste trabalho.

Da figura 2.41. é possível constatar que as misturas que contêm engaço, tanto para 45°C como para 55°C, apresentam volume de CO<sub>2</sub> acumulado superior. No que diz respeito ao grau de conversão de SV as diferenças não são significativas.

A degradação isolada do resíduo de aviário, A2\_45, apresenta grau de conversão SV e um volume de CO<sub>2</sub> acumulado semelhante ao registrado pela generalidade das misturas em estudo.

De destacar o reduzido volume de CO<sub>2</sub> acumulado a par do também diminuto grau de conversão.

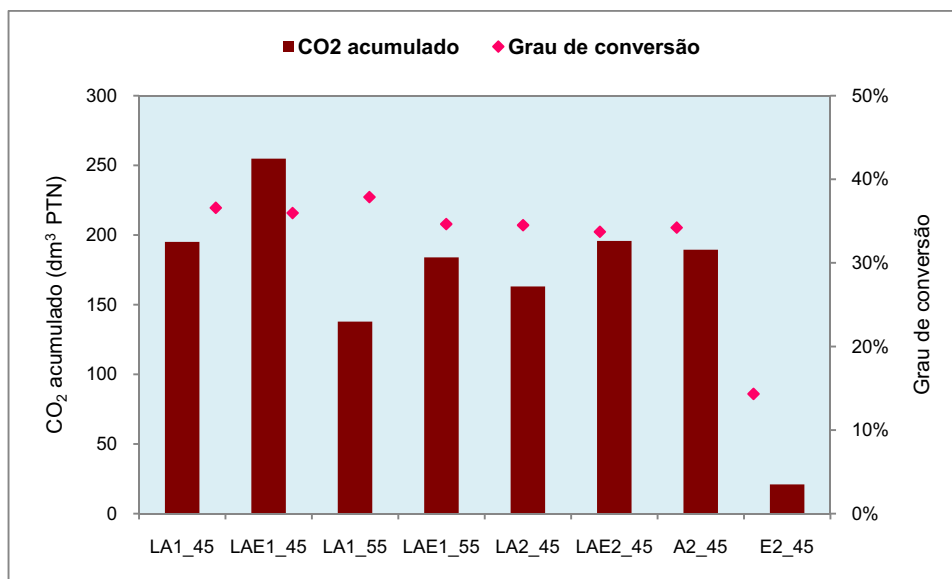


Figura 2.41: Grau de conversão total das misturas vs CO<sub>2</sub> acumulado nas misturas e substratos em estudo, nos ensaios 1 e 2.

Não obstante, anteriormente, o grau de conversão dos substratos ter sido determinado por dois métodos distintos (ver figuras 2.22 e 2.24), a análise da figura 2.41 baseia-se no volume de CO<sub>2</sub> acumulado, pelos diversos substratos, e no grau de conversão SV médio.

O contexto experimental e os pressupostos teóricos associados à determinação do grau de conversão de SV e do grau de conversão de SV na base cinza constante, acarretam erros sistemáticos e fortuitos, o que, apesar da semelhança dos resultados, pode evidenciar tendências distintas de afastamento dos resultados obtidos em relação ao grau de conversão real dos substratos. Considera-se, por isso que, a determinação do grau de conversão médio constitui a melhor aproximação aos resultados reais, uma vez que atenua as contribuições dos diferentes tipos de erros associados.

### 2.3.11. Balanço do azoto

O azoto, N, é determinante no curso do processo e na qualidade do composto. Neste estudo, o azoto é abundante no início do processo, uma vez que está presente em proporções muito significativas no resíduo de aviário e na lama (ver tabela 2.2).

Finalizada a degradação, dependendo da forma e da proporção em que incorpora o composto final, o azoto poderá, ainda, potenciar ou inibir o crescimento das plantas. No início dos ensaios, este elemento químico, está associado apenas à fase sólida, uma vez que só existe nas misturas e substratos em estudo. Após a degradação é detectado na

fase sólida, líquida e gasosa, pois, para além da presença no composto final, há também a considerar, a purga líquida e as emissões gasosas.

Nas tabelas 2.12 e 2.13 apresenta-se as proporções de azoto nas diferentes formas e fases, no início e no final dos ensaios, respectivamente, nas misturas e substratos a degradar e nos compostos daí resultantes.

Tabela 2.12: A presença do azoto nas misturas e nos substratos em estudo no início do ensaio 1 e do ensaio 2.

Início do ensaio				
Misturas iniciais	Fase sólida			
	$W_{NKj}$ (bs)	Massa N- $N_{Kj}$ (g)	Fracção N- $N_{Amon}$	Fracção N- $N_{Org}$
LA1_45	0,036	18,15	0,13	0,87
LAE1_45	0,033	17,72	0,13	0,87
LA1_55	0,036	17,85	0,13	0,87
LAE1_55	0,033	18,70	0,13	0,87
LA2_45	0,045	20,56	0,17	0,83
LAE2_45	0,042	18,48	0,17	0,83
A2_45	0,026	14,07	0,04	0,96
E2_45	0,010	2,39	0,12	0,88

De referir que, os valores apresentados nas tabelas 2.12 e 2.13 representam o valor médio obtido após analisar 3 replicas de cada amostra recolhida de cada mistura ou substrato.

Tabela 2.13: A presença do azoto nas misturas e nos substratos em estudo no final do ensaio 1 e do ensaio 2.

Final do ensaio						
Composto resultante dos ensaio	Fase sólida				Fase líquida	Fase gasosa
	$W_{NKj}$ (bs)	Massa N- $N_{Kj}$ (g)	Fracção N- $N_{Amon}$	Fracção N- $N_{Org}$	Massa N- $N_{Kj}$ (g)	Massa N- $N_{Amon}$
LA1_45	0,035	11,01	0,16	0,84	0,89	4,75
LAE1_45	0,037	11,56	0,19	0,81	1,00	2,91
LA1_55	0,025	6,30	0,12	0,88	1,19	6,00
LAE1_55	0,024	9,37	0,13	0,87	1,31	5,53
LA2_45	0,048	13,51	0,22	0,78	0,46	3,84
LAE2_45	0,045	11,67	0,20	0,80	0,84	4,55
A2_45	0,032	9,85	0,10	0,90	1,97	3,80
E2_45	0,010	1,74	0,06	0,94	0,02	0,00

A análise do balanço mássico apresenta um erro associado que varia entre os 8 e os 25% e cuja origem, em detalhe, está ainda por determinar. Tal poderá, futuramente, originar estudos complementares.

O erro, acima referido, surge por defeito relativamente aos produtos. Poder-se-ão ter formado outros compostos azotados, como nitratos ou óxido nítrico e outros, que, por não terem sido analisados, também não foram contabilizados no balanço mássico.

As figuras 2.42 e 2.43 reproduzem, graficamente, os resultados apresentados na tabela 2.13 e correspondem à distribuição de N, nas suas diferentes formas após a degradação das misturas e substratos em estudo, respectivamente no ensaio 1 e 2.

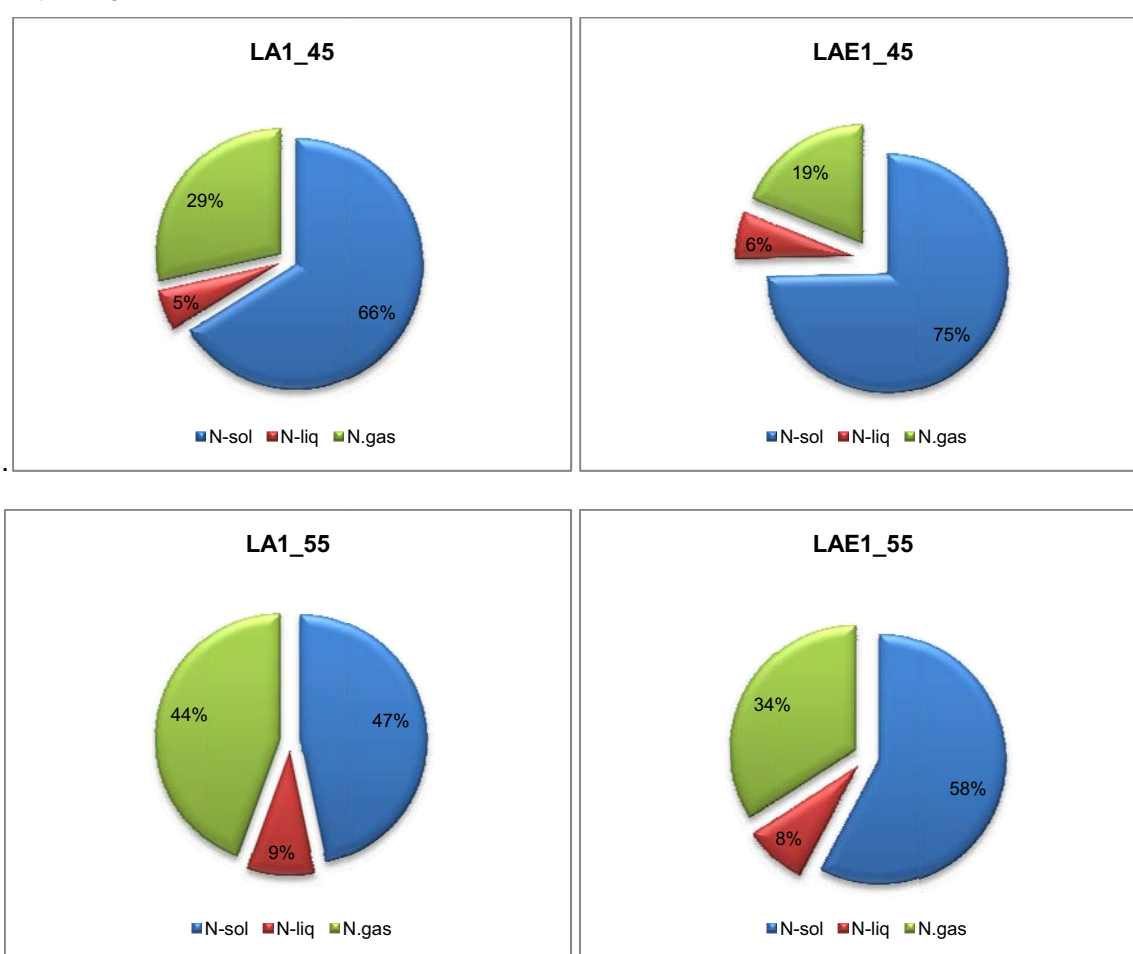


Figura 2.42: A presença, nas diferentes formas, do azoto no composto resultante da decomposição das misturas LA1\_45, LAE1\_45, LA1\_55 e LAE1\_55.

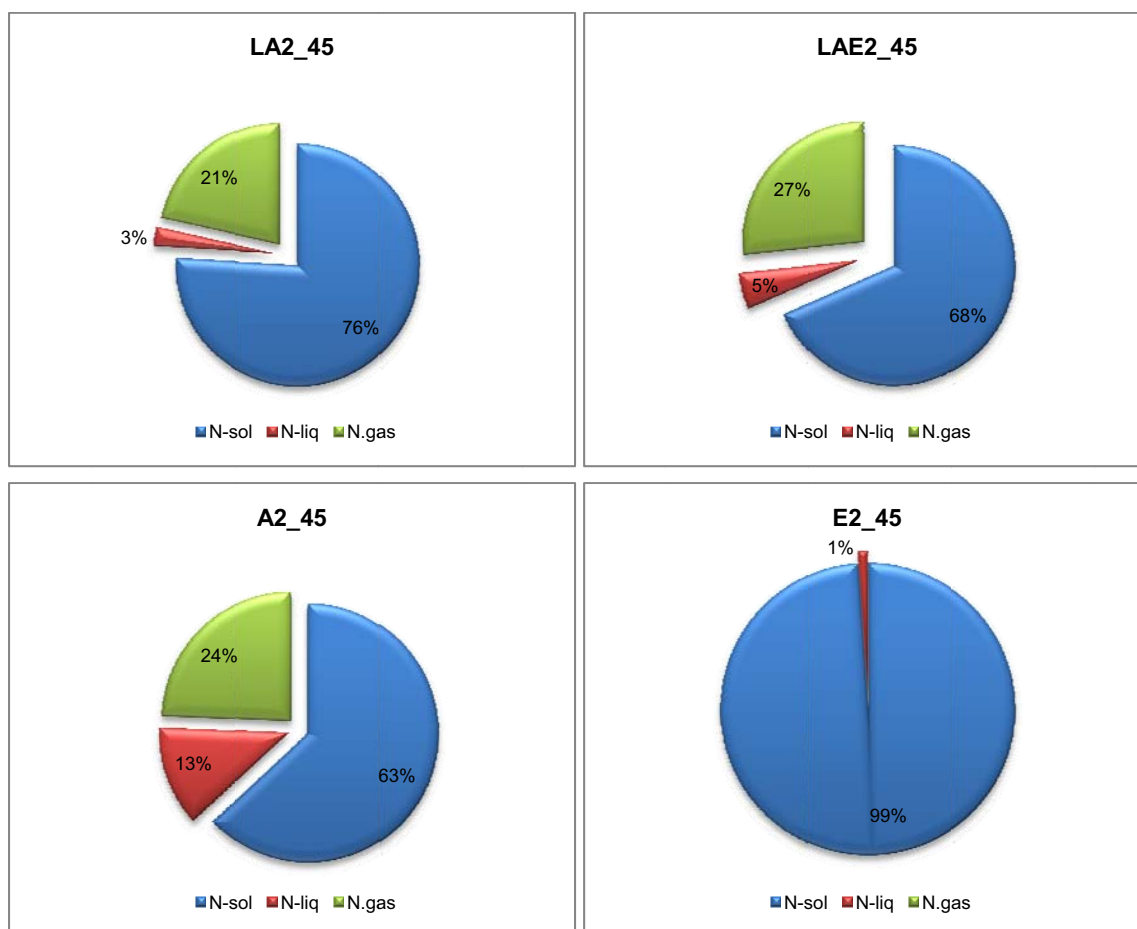


Figura 2.43: A presença, nas diferentes formas, do azoto no composto resultante da decomposição das misturas LA2\_45, LAE2\_45, do resíduo de aviário, A2\_45, e do engaço, E2\_45.

Verifica-se que, no ensaio 1, para temperaturas mais elevadas, 55°C, é maior a percentagem de azoto que surge associada ao efluente gasoso, o que corresponde a uma diminuição do azoto na fase sólida.

Na mistura 1, a presença de engaço ajuda a conservar o azoto no composto. Na mistura 2 este efeito não é tão notório. Os agentes de porosidade podem induzir este efeito de absorção de  $\text{NH}_3$  (g) (Tíquia, 2002).

Em ambos os ensaios, verifica-se que, a maioria do azoto se mantém associado à fase sólida, o que indicia que o composto, quaisquer que sejam as condições de operação, deverá, enquanto fonte de azoto, potenciar o crescimento das plantas.

Para além disso, este facto leva a que a purga (fase líquida), e as emissões gasosas, não constituam problemas de maior, no que concerne o tratamento dos efluentes líquidos e a formação de odores desagradáveis. No entanto, as maiores perdas de N ocorrem na volatilização do amoníaco, na lixiviação (Brito, 2003).

Da análise da figura 2.43, é ainda possível observar que, é pela volatilização do amoníaco que ocorre a maior “perda” de azoto. As fugas deste nutriente contabilizadas num intervalo entre 19 e 44%, estão de acordo com o que tem sido verificado noutros trabalhos (Paillat, 2005).

Refira-se que, neste trabalho, os efluentes líquidos recolhidos não foram reintroduzidos no processo. A sua possível reutilização no processo, também poderia ser alvo de estudo complementar, o que à partida poderia levar a que, à escala industrial, ocorra diminuição significativa dos volumes de purga a tratar e de água a incorporar no processo.

### **2.3.12. Avaliação da qualidade do composto**

Os compostos produzidos no âmbito deste trabalho foram avaliados sob duas vertentes distintas, a vertente dos contaminantes e a da estabilidade/maturação.

O composto obtido através da degradação das misturas é isento de contaminantes físicos, isto é, isento de vidros, de plásticos, de pedras, uma vez que nem a origem, nem o trajecto dos resíduos, do produtor até unidade de compostagem, promove a introdução de tais elementos.

No que diz respeito a contaminantes químicos, de acordo com o procedimento apresentado na Tabela 2.1, foi avaliado o teor de metais pesados.

Os resultados apresentados na Tabela 2.14, revelam a conformidade do composto, depois de comparados com os valores máximos recomendados, resumidos na Tabela 2.15, e com os documentos normativos aplicáveis à tipologia dos resíduos do presente trabalho, como é o caso do Decreto-Lei nº276/2009, que estabelece o regime a que obedece a deposição de lamas de depuração em solos agrícolas e a Proposta de Norma Técnica sobre Qualidade e Utilizações do Composto (Gonçalves e Batista, 2004).

Não obstante os valores apresentados na tabela 2.14 serem inferiores aos recomendados na Decisão Comunitária 2006/799/CE, o composto não pode candidatar-se ao rótulo ecológico como produto “correctivo de solos”, uma vez que os resíduos originais incorporam lamas de depuração.



Tabela 2.14: Concentração dos elementos metálicos em mg/kg, base seca. (ND - não detectável, LQ - limite quantificável).

Composto resultante dos ensaios 1 e 2								
Metais	LA1_45	LAE1_45	LA1_55	LAE1_55	LA2_45	LAE2_45	A2_45	E2_45
Cádmio	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Chumbo	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<LQ
Cobre	32	39	31	42	29	37	29	69
Crómio	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	26	19	ND	ND
Níquel	21	21	22	21	25	24	17	17
Zinco	164	214	169	175	112	171	169	119

Tabela 2.15: Valores máximos admissíveis para os teores “totais” de metais pesados em mg/kg de matéria seca.

Valores máximos admissíveis para os teores “totais” de metais pesados, no Composto, segundo a Proposta de Norma Técnica sobre Qualidade e Utilizações do Composto (Gonçalves e Batista, 2004)				Valores limites de metais de concentração de metais pesados nas lamas destinadas à agricultura, segundo o DL 276/2009.
Metais (mg/kg)	Composto			
	Classe I	Classe II	Classe III	
Cádmio	0,7	1,5	5,0	20
Chumbo	100	150	500	750
Cobre	100	200	600	1000
Crómio	100	150	600	1000
Mercurio	0,7	1,5	5,0	16
Níquel	50	100	200	300
Zinco	200	500	1500	2500

Relativamente a contaminantes biológicos, não foi possível efectuar análises de quantificação de *E. coli* e de detecção de *Salmonella* e ovos de helmintas.

O prolongamento do período de degradação das misturas, até se verificar uma produção de CO<sub>2</sub> residual, permite inferir a estabilidade relativa do composto, a partir da actividade microbiológica. Um outro indicador da estabilidade dos compostos obtidos é a cor castanha escura que todos apresentam.

Em relação ao pH, e reanalisando as figuras 2.25 e 2.26 é possível observar que, o pH se mantém, razoavelmente, constante, nas últimas aberturas dos reactores. Podemos daí inferir, também, a estabilidade do composto obtido nos ensaios 1 e 2.

A caracterização química possibilita a avaliação do parâmetro, razão C/N para as misturas e substratos iniciais, a degradar, e para o composto, obtido no final dos ensaios.

Seguidamente, apresenta-se a metodologia adoptada para a determinação do parâmetro C/N:

Fase 1 - Através da caracterização apresentada nas Tabelas 2.2 e 2.4., foi efectuada uma estimativa da relação empírica entre as fracções mássicas de SV ( $W_{SV}$ ) e de carbono ( $W_C$ ), apenas para os substratos em estudo. Uma vez que o quociente  $W_{SV}/W_C$ , apresenta, para o resíduo de aviário e para a lama, um valor médio igual a 2 é possível estabelecer a relação presente na Eq: 2.19, formalmente análoga à utilizada por diversos autores (Haug, 1983):

$$W_C = \frac{W_{SV}}{2} \quad \text{Eq: 2.19}$$

Fase 2 - Assumindo como aplicável a Eq. 2.19, tendo como base os resultados apresentados nas figuras 2.19 e 2.20, em relação ao teor de SV, foi efectuada uma estimativa da fracção mássica de carbono, para cada um dos compostos obtidos, no final dos ensaios,  $W_{C,final}$ . (ver tabela 2.16).

Fase 3 - De acordo com as fracções mássicas de carbono e de azoto das misturas iniciais (Tabelas 2.4, 2.10 e 2.11) foi determinada a razão C/N inicial. Posteriormente, suportadas pela estimativa de  $W_{C,final}$  e pelos valores finais de  $W_{NKj}$  (Tabelas 2.12 e 2.13) foi determinada a razão C/N final, isto é, razão C/N nas misturas degradadas.

A Tabela 2.16 resume o cálculo da variação do parâmetro razão C/N durante o processo de degradação.

À excepção dos valores obtidos na degradação isolada do engaço, tanto o resíduo de aviário como as misturas testadas apresentam valores concordantes com os recomendados na literatura da especialidade (secção 2.1.3.4).

É ainda possível verificar que, nos ensaios a 45°C, o quociente entre  $(C/N)_{final}$  e  $(C/N)_{inicial}$ , de acordo com o “Manual de Compostagem” da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Viana do Castelo, apresenta valores na gama recomendada para composto maturado (Brito, 2003). Tal, não se verifica nos ensaios a 55°C, uma vez que, o composto daí resultante, quando comparado com a mistura inicial, revela um empobrecimento em azoto.

Tabela 2.16: Valores estimados da fracção de carbono no composto e valores calculados da razão carbono/azoto

Composto resultante dos ensaios								
Parâmetros	LA1-45	LAE1-45	LA1-55	LAE1-55	LA2-45	LAE2-45	A2-45	E2-45
$W_{C,final}$	0,355	0,366	0,357	0,357	0,352	0,362	0,379	0,472
$(C/N)_{inicial}$	13	13	13	13	12	12	15	53
$(C/N)_{final}$	10	10	14	15	7	8	12	47
$\frac{(C/N)_{final}}{(C/N)_{inicial}}$	0,78	0,76	1,07	1,14	0,61	0,67	0,80	0,89

Numa perspectiva de complementaridade de avaliação da estabilidade, foi realizado um bioensaio para cada composto obtido. Os testes efectuados permitem avaliar, conjuntamente, a germinação e o crescimento, através da determinação do índice de germinação e crescimento ( $I_{CG}$ ).

Terminados os ensaios, e obtido o composto resultante da degradação das misturas LA1\_45, LA1\_55, LAE1\_45, LAE1\_55, LA2\_45 e LAE2\_45, cada uma das amostras esteve a maturar durante 4 semanas. Nesse período, o composto foi, por diversas vezes, revolvido e repousou acondicionado em vasos, devidamente identificados. De seguida, foi misturado com turfa enriquecida, em proporções 25:75 e 50:50, em pequenos vasos, tendo sido realizadas 3 réplicas para cada uma das misturas em estudo.

Em cada vaso, os preparados finais, constituídos por diferentes proporções de composto e de turfa, igual quantidade de sementes de azevém (*Azevém lolium multifolium*) estiveram sujeitos, durante 15 dias, a condições semelhantes, favoráveis à germinação e crescimento, nomeadamente, no que diz respeito à humidade, à presença de luz solar e à presença de nutrientes.

Simultaneamente, foram realizados três brancos (controle), isto é, três vasos somente com turfa, com igual número de sementes de azevém, onde estas germinaram e cresceram.

Respeitados os períodos de germinação e crescimento, as plantas foram cortadas, secas numa estufa a 105°C, durante 24 horas, e colocadas numa balança onde se procedeu à medição das respectivas massas.

As tabelas 2.17 e 2.18 apresentam os valores médios das massas secas, correspondentes a três réplicas, de azevém recolhidas, em cada uma das misturas em

estudo, o desvio padrão, o coeficiente de variação associado, bem como os índices de crescimento e germinação respectivos, determinados através da equação 2.18.

$$I_{CG} = \frac{\text{Massa vegetal seca (g)}}{\text{Massa Branco vegetal seco (g)}} \quad \text{Eq: 2.20}$$

Tabela 2.17: Crescimento de azevém em substrato sem composto (Branco) e com a adição de composto LA1\_45, LA1\_55 e LAE1\_45, em diferentes proporções.

Teste de vaso	Mistura						
	Branco	LA1_45		LA1_55		LAE1_45	
		25	50	25	50	25	50
<b>% de composto</b>							
<b>Valor médio</b>	0,319	0,378	0,341	0,377	0,324	342	0,348
<b>Desvio padrão</b>	0,007	0,013	0,018	0,011	0,019	0,003	0,022
<b>Coeficiente de variação</b>	0,021	0,034	0,053	0,028	0,057	0,009	0,062
<b>Índice (<math>I_{CG}</math>)</b>		1,18	1,07	1,18	1,01	1,07	1,09

Tabela 2.18: Crescimento de azevém em substrato sem composto (Branco) e com a adição de composto LAE1\_55, LA2\_45 e LAE2\_45, em diferentes proporções.

Teste de vaso	Mistura						
	Branco	LAE1_55		LA2_45		LAE2_45	
		25	50	25	50	25	50
<b>% de composto</b>							
<b>Valor médio</b>	0,319	0,335	0,308	0,358	0,321	0,361	0,331
<b>Desvio padrão</b>	0,007	0,025	0,013	0,025	0,017	0,006	0,013
<b>Coeficiente de variação</b>	0,021	0,075	0,041	0,069	0,053	0,017	0,041
<b>Índice (<math>I_{CG}</math>)</b>		1,05	0,96	1,12	1,01	1,13	1,04

Os resultados apresentados nas tabelas 2.17 e 2.18 revelam que, tanto os preparados finais com 25% de composto, como os que contêm 50% de composto, apresentam valores de índice de crescimento e germinação ( $I_{CG}$ ) superiores a 0,9. Assim, de acordo com Gonçalves e Batista (2004), a interpretação dos resultados da produção relativa, em ensaios de vaso, com o composto resultante da degradação das misturas em estudo, revela que o composto é de óptima qualidade, pelo que, pode ser aplicado no solo, enquanto substrato de suporte de culturas.

A figura 2.44 mostra o resultado do teste de vaso aplicado ao branco e ao composto obtido da degradação das misturas, em estudo, no ensaio 2. Para as misturas em estudo no ensaio 1, não se observaram diferenças dignas de registo, isto é visualmente o resultado do ensaio 1 é semelhante ao do ensaio 2.

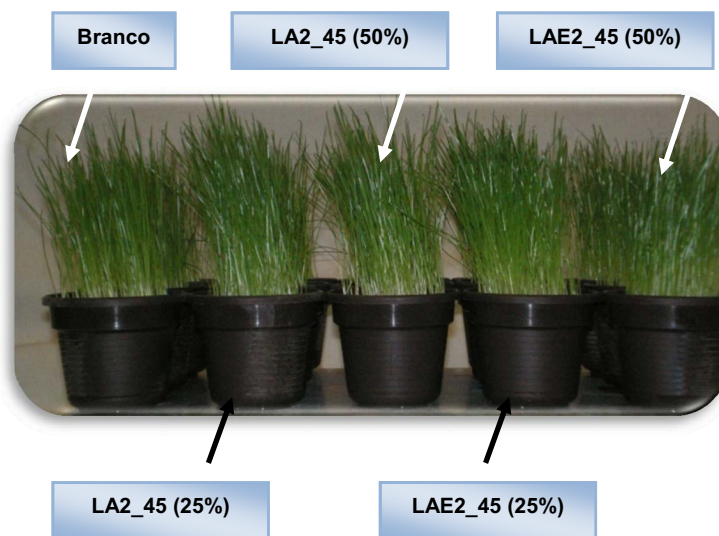


Figura 2.44: Teste de vaso referente ao branco e às misturas LA2\_45 e LAE2\_45, em estudo no ensaio 2.

#### 2.4. Conclusões

Dos resultados obtidos verifica-se que, a co-compostagem da lama e do resíduo de aviário, com ou sem engajo enquanto agente estruturante, decorre com sucesso.

Reduzir o teor de humidade da lama e a dimensão dos pedaços de engajo pode promover, nas misturas em estudo, condições mais propícias à degradação.

Nos diversos ensaios realizados, o grau de conversão de SV atingiu, num mês, em média, 37 %, permitindo a obtenção de um composto estabilizado e, ainda, rico em matéria orgânica.

Não existem diferenças significativas no grau de conversão de SV nas misturas testadas. No entanto, em relação à libertação de CO<sub>2</sub>, as misturas testadas a 45°C, apresentam valores mais elevados.

O engajo revelou-se benéfico no processo de degradação de todas as misturas favorecendo as trocas gasosas, nomeadamente, a libertação de CO<sub>2</sub>. Enquanto agente estruturante, melhorou as condições de degradação das misturas.

A presença de lamas de depuração nas misturas inviabiliza, à partida, o cumprimento dos requisitos necessários à obtenção de rótulo ecológico, tal como presente na Decisão da Comissão Europeia 2006/799/CE. No entanto, relativamente aos parâmetros analisados, os compostos resultantes da degradação, cumprem o estabelecido no Decreto-lei 276/2009 que estabelece o regime jurídico da utilização

agrícola das lamas de depuração, por essa razão, a sua aplicação nos solos, enquanto correctivo orgânico ou mineral, é perfeitamente adequada, nomeadamente, no que se refere aos metais pesados.

Os testes de germinação e crescimento, com composto maturado, que determinam o potencial de valorização do composto (aplicação no solo) revelaram, independentemente das condições operacionais, ausência de fitotoxicidade na germinação e crescimento do azevém.

Os ensaios a 45°C mostraram-se mais vantajosos, relativamente à conservação do azoto no composto, em geral, visto, a 55°C, se verificar a volatilização do amoníaco, com valores na ordem dos 40%. Por outro lado, a mobilização de azoto na fase líquida é reduzida em qualquer uma das situações estudadas. No final, o composto apresenta percentagens de azoto compreendidas entre 2,4 e 4,8% bs, valores concordantes com os produtos de mercado.

A co-compostagem de resíduos de aviário, engaço e lamas secundárias de ETAR de celulose permite produzir um composto com qualidade suficiente para ser aplicado no solo.

## Referências

APA, Agência Portuguesa do Ambiente, (2010). Consulta a 04 de Março, 2010, em <http://www.apambiente.pt/politicasambiente/Residuos/planeamentoresiduos/peragri/Paginas/default.aspx>.

Bach, P., Shoda, M., Kubota, H. (1984). Rate of Composting of Dewatered Sewage Sludge in Continuously Mixed Isothermal Reactor. *J. Ferment. Technol.*, 62 (3) pp. 285-292.

Brito, L. M. 2003. Manual de compostagem. Escola Superior Agrária de Ponte de Lima, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 26 p.

Carteiro, Pedro. (2002). *Estratégia para a valorização orgânica das lamas de ETAR's*. Volume de comunicações - Gestão e valorização de ETA's e ETAR's em Portugal, Lisboa.

Decisão da Comissão de 3 de Novembro de 2006 que estabelece os critérios ecológicos revistos e os respectivos requisitos de avaliação e verificação para a atribuição do rótulo ecológico comunitário aos correctivos de solos. *Jornal Oficial da União Europeia* Texto relevante para efeitos EEE (2006/799/CE).

Decreto-Lei n.º 178/2006 de 5 de Setembro, Diário da República, Iª Série - N.º 171 – 5 de Setembro de 2006, pp: 6526-6545.

Decreto-Lei n.º 276/2009 de 2 de Outubro, DIÁRIO DA REPÚBLICA – I SÉRIE, N.º 192 – 2 de Outubro de 2009, pp: 7154-7165.

Fletcher, S. I.; Durrant, A.P.; & Tucker P. (2000). Composting modelling – a literature review of existing models and their applicability to domestic composting. *Progress in Environmental Science*, 2(2): 109-128.

Golueke, Clarence G. (1997). *Handbook of Solid Waste Management.*, Van Nostrand Reinhold Company.

Gomes, A. P. D. (2006). *Tratamento de Resíduos Sólidos*. Sebenta de Tratamento de Resíduos Sólidos. Departamento de Ambiente e Ordenamento – Universidade de Aveiro.

Gomes, Ana.P., Nunes, Maria.I., Vitoriano, Cândida.C. e Elisabete Pedrosa (2009) Co-Composting of Biowaste and Poultry Waste. Department of Environmental and Planning, University of Aveiro, Portugal.

- Gómez, Raquel Barrena; Lima, Felicitas Vasquez; & Ferrer, Antoni Sánchez (2006). The use of respiration indices in the composting process: a review. *Waste Management & Research*, 24: 37-47.
- Gonçalves, Manuel Souteiro (2005). *Gestão de Resíduos Orgânicos*. Porto, Sociedade Portuguesa de Inovação (1ª edição).
- Gonçalves, Manuel Souteiro e Batista, Marco. (2004). *Documento baseado na "Proposta de norma portuguesa sobre qualidade do Composto para utilização na agricultura"*. Outubro de 2001, e no "Working document – Biological Treatment of Biowaste – 2<sup>nd</sup> Draft", DG ENV. A.2, Fevereiro de 2001.
- Hansen, R.C., Keener, H.M., Marugg, C., Dick, W.A. e Hoitink, H. A. J. (1993) Composting of poultry Manure. *Science and Engineering of Composting*, Eds H.A.J. Hoitink and H.M. Keener, Renaissance Publications, Worthington, Ohio: 131-153.
- Haug, Roger T. (1993). *The Pratical Handbook of Compost Engineering*. Florida, Lewis Publishers.
- Komilis, Dimitris P. & Ham, Robert K. (2005). Carbon dioxide and ammonia emissions during composting of mixed paper, yard waste and food waste. *Waste Management (in press)*.
- Leconte, M.C., Mazzarino, M.J., Satti, P., Iglesias, M.C. e Laos, F. (2009). Co-Composting rice hulls and/or sawdust with poultry manure in NE Argentina. *Waste Management*, 29: 2446-2453.
- Lemos, Luís.T., Silva, Maria.E., Cristina Cunha-Queda, A., Nunes, Olga.C. (2009) Co-composting of poultry manure with low quantities of carbon-rich materials. *Waste Management, & Research*. 27: 119-128.
- Marche, T. *et al* (2003). Chemical changes during composting of a paper mill sludge-hardwood sawdust mixture. *Geoderma*, 116, 345-356
- Marques, A. S. (2008). Valorização Orgânica do Subproduto da Destilação do Bagaço de Uva. Tese de Mestrado. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.
- Matos, M. A. A. & Pereira, F. J. M. A. (2004, Fevereiro). *Operações de Tratamento Biológico. Compostagem*. Sebenta de Tratamento e Gestão de Resíduos Sólidos. Volume 10. Departamento de Ambiente e Ordenamento – Universidade de Aveiro.



Paillat, Jean-Marie, Robin, Paul; Hassouna, Mélynda; & Laterme, Philippe (2005). Predicting ammonia and carbon dioxide emissions from carbon and nitrogen biodegradability during animal waste composting. *Atmospheric Environment*, 39: 6833-6842.

Portaria n.º 83/2010 de 10 de Fevereiro, DIÁRIO DA REPÚBLICA – I SÉRIE, N.º 28 – 10 de Fevereiro de 2009, pp: 380-392.

Regulamento (CE) n.º 834/2007 do Conselho de 28 de Junho de 2007, relativo à produção biológica e à rotulagem dos produtos biológicos e que revoga o Regulamento (CEE) n.º 2092/91. *Jornal oficial da União Europeia*. Consulta a 04 de Julho, 2009, em <http://vlex.pt/vid/biologica-rotulagem-biologicos-revoga-36467243>.

Rynk, R. (2003). “The Art in Science of Compost Maturity”, *Compost Science and Utilization*, Vol. 11 (2) pp. 94 – 95.

Sanches, A.P. (2007). Aplicação do processo de compostagem na estabilização de resíduos de aviário. Tese de Mestrado. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.

Santos, Luís Manuel da Costa. (1997). *Resíduos com interesse agrícola. Evolução de parâmetros da sua compostagem*. Bragança, Edição do Instituto Politécnico de Bragança.

Senesi, N. (1989). “Composted Materials as Organic Fertilizers”, *The Science of the Total Environment*, (81/82) pp.521 – 542.

Tiquia, Sonia M.; Wan, Judy H. C.; & Tam, Nora F.Y. (2002). Characterization and composting of poultry litter in forced-aeration piles. *Process Biochemistry*, 37: 869-880.

University of Illinois Extension. *History of Composting*. Consultado a 07 de Maio, 2009, em <http://web.extension.uiuc.edu/homecompost/history.html>.

Zucconi, F., Forte, M., Bertoldi, M. de; (1981). “Biological Evaluation of Compost maturity”, *BioCycle*, August: 54-5

### **3. Agregados leves**

#### **3.1. Introdução**

Nesta fase do trabalho foi estudada a incorporação de composto (resultante da degradação da lama com resíduo de aviário) e de resíduo de aviário, bem como as condições óptimas de operação na produção de agregados leves, com aplicação na construção civil.

Subjacente a estes ensaios, está ainda a possibilidade de substituir a argila, recurso natural finito, enquanto matéria-prima necessária à produção dos, referidos, agregados e o desenvolvimento de vias alternativas de valorização de resíduos. Refira-se que, actualmente, o composto, desde que cumpra um conjunto de requisitos mínimos, anteriormente referenciados, é aplicado na agricultura.

O elevado teor de humidade das lamas constitui um obstáculo à sua incorporação na produção de agregados leves, pelo que, com estes ensaios, se pretende ainda testar a viabilidade da compostagem como técnica de pré-tratamento (secagem de lamas) e de incorporação combinada de resíduos na produção de agregados leves.

##### **3.1.1. Definições e propriedades**

Consideram-se agregados leves materiais particulados, incoesivos, constituídos por misturas de partículas de tamanhos diversos e, praticamente, inertes do ponto de vista químico (Bauer, 2000).

Em termos de origem, os agregados são classificados em naturais ou de processamento industrial. Quanto à dimensão das partículas, são divididos em agregados miúdos ou graúdos. Finalmente, em relação ao peso específico aparente, são classificados em agregados leves, médios e pesados (Bauer, 2000).

Os agregados leves são de uso corrente na construção civil e estão, regularmente, associados ao betão. Os agregados leves podem ocupar entre 60 a 80% do volume absoluto do betão. A sua utilização influencia, para além das propriedades do referido betão, a proporção em que se mistura a água, o cimento (agente ligante) e o próprio agregado leve, consequentemente, os custos de produção associados. Torna-se ainda essencial que, o agregado se mantenha estável no interior do betão e que não o afecte negativamente no seu desempenho, no estado fresco ou depois de endurecido (Smith, 1993).

A densidade de um betão, dito normal, ronda os  $2000 \text{ kg/m}^3$ . Existem situações em que, para construir estruturas de maior altura ou de maior vão, há absoluta necessidade de diminuir a massa dessas estruturas sem, no entanto, diminuir a sua resistência. A solução passa pela aplicação de betões “mais leves”, de densidade inferior a  $1800 \text{ kg/m}^3$ , o que se consegue, através da incorporação de agregados leves. Esta diminuição da densidade do betão, à custa da incorporação destes agregados, confere-lhe um menor coeficiente de condutibilidade térmica, o que se reflecte na melhoria das suas propriedades térmicas.

### **3.1.2. Processo de produção de agregados leves**

Neste contexto, a escolha racional dos tipos de agregados leves a utilizar, baseia-se nas informações acerca: da sua forma, estado da superfície e estrutura dos grãos; da dimensão dos grãos; das massas volúmicas; da porosidade, da absorção de água e da resistência mecânica dos grãos (Lourenço, 2004). Estas características são condicionadas pelo processo de fabrico dos respectivos agregados.

Os agregados leves de argila expandida podem ser obtidos através de dois processos distintos: por sintetização ou em forno rotativo (H. Thomas A., 1994).

No processo de sintetização, a matéria-prima, a argila, é misturada em proporções adequadas, colocada num forno, através de grelha móvel, e, posteriormente, queimada. Destas acções resulta uma camada fundida, sem qualquer tipo de recobrimento, com todos os poros abertos, logo, com elevada capacidade de absorção de água e com massa específica que varia entre  $650$  e  $900 \text{ kg/m}^3$ . Posteriormente, esta camada fundida é britada e separada em diferentes granulometrias (H. Thomas A., 1994).

No processo de forno rotativo, o mais comum na produção destes agregados, são aproveitadas determinadas características da argila que, depois de aquecida, a temperaturas elevadas, se transforma numa camada fundida e viscosa, que permite capturar os gases, que se formam, e aprisioná-los, na carapaça externa vitrificada. A massa específica do agregado obtido por este processo varia entre  $300$  e  $650 \text{ kg/m}^3$  (H. Thomas A., 1994 e Fakhfalk *et al*, 2004).

### **3.1.3. Fenómeno de Expansão**

A densidade aparente dos agregados leves deve-se à sua estrutura interna porosa. Genericamente, esta estrutura celular forma-se a altas temperaturas quando alguns dos

constituintes da argila mudam de estado, se transformam em gases, e ficam retidos dentro da massa de argila que, entretanto, começou a fundir.

Para que este fenómeno de expansão se verifique, nas argilas ou em qualquer outro material, considera-se essencial que o material contenha algumas substâncias, que estas se dissociem e reajam com outras, originando novas substâncias, que se libertam sob a forma gasosa, próximo da temperatura de fusão. Terá, ainda, de existir um equilíbrio entre os agentes de fluxo (óxidos alcalinos, alcalino-terrosos e óxido de ferro), a sílica e a alumina (representado, habitualmente, através de um diagrama ternário), de forma a produzir uma pasta fundida, com viscosidade adequada, para que os gases libertados sejam capturados (Fakhfalk *et al*, 2004 & Monteiro *et al*, 2005).

De referir que, para que esta pasta fundida se venha a transformar num agregado com uso comercial, a temperatura dita de fusão deve ser inferior a 1300°C (Fakhfalk, *et al*, 2004).

A qualidade dos agregados pode ser determinada pelos valores da sua densidade, porosidade, bem como da sua resistência mecânica, e resulta da combinação de valores reduzidos de densidade e valores elevados de resistência mecânica (Fakhfalk *et al*, 2004 e Monteiro *et al*, 2005).

A resistência mecânica depende da porosidade da pasta fundida, em quantidade relativa e viscosidade, dos gases libertados, durante a fase vítrea, e da neoformação de alguns minerais, como a mulite (Fakhfalk *et al*, 2004).

O aprisionamento dos gases é responsável pela redução da densidade do agregado, enquanto que a vitrificação promove a imobilização de metais pesados, incrementa a resistência interna e a diminuição da porosidade (Weinecke, 2002).

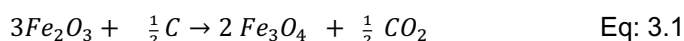
De forma a atingir o equilíbrio delicado entre as características acima referidas, para além do ajuste composicional, tem de se controlar o ciclo de queima (relação temperatura-tempo) de forma a promover a vitrificação exterior e a intensa expansão interna (Monteiro *et al*, 2005). Caso o material vitrifique em demasia, pode ocorrer a agregação dos diferentes corpos. Para minimizar este efeito é vulgar promover a formação de uma carapaça inerte, que reduz a tendência de colagem, adicionando, por exemplo, areia de sílica ou calcite (Weinecke, 2002).

Refira-se, ainda, a importância do tamanho das partículas que constituem o material cru, uma vez que, quanto maior for a quantidade de partículas finas, maior será o volume de gás envolvido e aprisionado nos grânulos durante o processo de aquecimento

(Fakhfalk *et al*, 2004). No entanto, a origem dos gases que provocam a expansão é controversa e, desde a década de 50, que se associa essa expansão às reacções de oxidação entre o ferro e a matéria orgânica, presente na matéria-prima a expandir (Cougny, 1990).

Os óxidos de ferro desenvolvem acção fundente e a expansão adequada da massa fundida. A matéria orgânica presente, desejavelmente em quantidades limitadas, evita que todo o ferro seja reduzido antes da formação da dita massa fundida (Cougny, 1990).

A equação química 3.1 permite calcular a quantidade de carbono que deverá existir num agregado à temperatura de expansão, de forma a possibilitar a redução do óxido de ferro e a consequente expansão desse agregado (Weinecke, 2002).



A acção do ferro não ocorre isoladamente, surge, enquadrada, numa mistura que pode abranger cerca de dez óxidos metálicos, mais ou menos activos, consoante o estado de fusão e a estrutura dos minerais envolvidos, e que interagem entre si e com a matéria orgânica, presente no material cru (Cougny, 1990).

A matéria orgânica, se presente em excesso, inviabiliza as reacções de oxidação-redução e, consequentemente, a expansão. Pode mesmo constituir um problema cuja solução passa pela aplicação de um tratamento especial de descarbonização (Cougny, 1990). Já a ausência de matéria orgânica, em quantidades consideradas adequadas, pode ser colmatada adicionando um material secundário, um agente expansivo, natural (serrim) ou artificial (hidrocarboneto – óleo usado), ajustando-se, assim, a composição química da mistura (Weinecke, 2002) e (De'Gennaro, 2004).

A saber ainda que, ao contrário do que sucede na indústria cerâmica, onde o aparecimento do coração negro é algo de indesejável e, portanto, passível de redução e, preferencialmente, de eliminação, na produção de agregados o aparecimento destas regiões escuras, geralmente cinzentas e mais fundentes, do que o composto oxidado, deverá ser maximizado. A fusibilidade da massa na região onde o ferro está reduzido - coração negro - é maior do que na restante área, o que dificulta a libertação dos gases gerados (Damiani, 2001).

O desenvolvimento do coração negro depende, directamente, da concentração de Fe e C nas matérias-primas. Todavia, caso o O<sub>2</sub>, presente na atmosfera do forno, consiga atravessar a estrutura porosa da massa fundida, atingindo a zona onde ocorrem as

reações, praticamente toda a matéria orgânica será transformada em CO<sub>2</sub>. Portanto, não se verificará a redução do ferro, logo, não se formará o coração negro (Damiani, 2001).

No início do processo de produção de agregados, aquando da selecção das matérias-primas, é conveniente ter acesso a um diagrama simples que permita definir a composição química, favorável à expansão, das misturas de materiais crus, a utilizar no processo (Riley, 1951). Além dos ensaios de composição química, também a análise mineralógica, granulométrica, e o comportamento térmico, dessa matéria-prima, se revelam determinantes (H. Thomas A., 1994).

#### **3.1.4. Matérias-primas alternativas/Testes de incorporação de resíduos**

A elevada produção de agregados leves, a nível industrial, causa danos importantes nos recursos naturais, uma vez que a matéria-prima dominante é a argila. Nestes últimos anos, têm sido estudados caminhos alternativos ao uso massivo deste recurso natural, alguns dos quais, têm incidido na incorporação de resíduos nas formulações de cariz argiloso, nomeadamente, resíduos minerais de pedreiras, lamas industriais resultantes do processo de produção de pasta de papel, resíduos têxteis e madeiras (Pinto *et al*, 2004a).

A elevada produção de lamas das ETARs das celuloses, 90 toneladas/dia, e os consequentes problemas de deposição deste resíduo em aterro podem ser minimizados pela incorporação destas lamas na produção de agregados leves de base argilosa, uma vez que, um forno típico, em funcionamento regular, pode gerar cerca de 25 toneladas/hora destes agregados. Além da inertização de resíduos, esta via alternativa permite, ainda, aumentar a longevidade de um recurso natural como a argila (Pinto, *et al*, 2004a).

Os materiais crus, a argila e as lamas a incorporar foram analisados sob a vertente química, física, térmica e mineralógica, de forma a determinar a influência deste resíduo nas propriedades finais dos agregados leves, nomeadamente, no esforço de compressão, na densidade aparente e na absorção de água. Comparativamente às características dos agregados leves de matriz de argila, a incorporação deste resíduo não provocou, em nenhum dos parâmetros analisados, alterações relevantes. Tendo em conta a origem destas lamas foram também efectuadas, durante os ensaios semi-industriais, análises às emissões gasosas, nomeadamente, à concentração de partículas, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HF, HCl CO e os sólidos voláteis, e à presença de metais pesados (Pinto, *et al*, 2004a).

Os resultados mostraram que, as emissões gasosas obtidas, com a adição de lamas à argila, são semelhantes às emissões gasosas emitidas apenas pela argila. Em relação aos metais pesados, a presença desses elementos poluentes encontra-se abaixo dos limites legais. Daí considerar-se que, os agregados leves resultantes deste processo têm contaminação, potencialmente, negligenciável (Pinto, *et al*, 2004a).

Todavia, apesar dos bons resultados obtidos, em relação às características deste novo agregado leve e às vantagens ambientais associadas à sua produção, o elevado teor de humidade das lamas provoca dificuldades energéticas na fase inicial do processo de queima, pelo que, se recomenda a aplicação de uma qualquer operação de secagem ou até mesmo de uma simples exposição ao ar, para promover a diminuição da humidade da lama (Pinto *et al*, 2004a) e (São Marcos *et al*, 2002).

A exposição da lama ao ar, executada, preferencialmente, pelo produtor da mesma, apresenta-se como uma opção desejável sob o ponto de vista da diminuição da humidade das lamas e da redução dos custos de transporte. No entanto, está condicionada ao espaço físico disponível (São Marcos *et al*, 2002).

A fase inicial deste trabalho diz respeito ao estudo do processo de degradação, com acesso ao oxigénio, de resíduo de aviário, de lamas secundárias das ETARs das fábricas de celulose e de engaço. Da co-compostagem destes três resíduos resulta um composto, razoavelmente, seco, se comparado com as lamas referidas anteriormente. Esta técnica de eliminação de resíduos poderá funcionar como, a tal prévia, operação de secagem, necessária para evitar o transtorno energético provocado pelas lamas *per si*, na produção dos agregados leves com base de argila. No entanto, atendendo ao carácter sazonal da produção de engaço, apenas as misturas de lama e resíduo de aviário foram consideradas para o estudo de viabilidade da produção de agregados leves, uma vez que são produzidos de forma continuada.

Espera-se ainda que, pelo facto dos agregados leves não terem forma nem tamanho fixo, a incorporação de níveis elevados de composto, na produção de agregados leves, à semelhança do que sucede com as lamas, venha a constituir mais uma via alternativa, na difícil tarefa de gestão sustentável de resíduos, retardando ou evitando a opção de fim de linha, a deposição em aterro (Pinto, S., Almeida, M. *et al*, 2004b) e (Monteiro *et al*, 2005). Esta solução poderá ter também um papel importante na aceitação da reutilização de resíduos industriais e, eventualmente, de resíduos agrícolas (Monteiro *et al*, 2005)

### 3.2. Procedimento experimental

Esta etapa descreve a obtenção de agregados leves, com características adequadas para aplicação em trabalhos de construção civil, à base de argila, resíduo de aviário e composto, resultante da degradação de lamas secundárias de ETAR de celulose e de resíduo de aviário.

As amostras analisadas foram retiradas de um conjunto de misturas de base argilosa, mas distintas entre si quanto à natureza e à proporção em massa dos aditivos orgânicos incorporados, respectivamente, 3, 5 e 10% de matéria orgânica. No entanto, ao longo desta fase do trabalho, apenas os resultados mais promissores, os referentes às amostras com 3% de matéria orgânica (MO), serão apresentados.

Com o intuito de determinar a composição mineralógica e o comportamento térmico da argila utilizada, efectuaram-se, respectivamente, análises de difracção de raios X (DRX), térmicas diferenciais (ATD) e gravimétricas (TG).

As misturas referenciadas neste trabalho constam da tabela 3.1, têm base argilosa e podem conter óleo, na proporção de 1% da massa de argila, enquanto agente expansivo comum (composição de referência – ACO). Em alternativa, usou-se resíduo de aviário e composto (degradação de lamas secundárias de ETAR de celulose e de resíduo de aviário).

Tabela 3.1: Composição das misturas em estudo (ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp).

Tipo de mistura	Composição
<b>ACO</b>	Argila com óleo (Padrão, preparada pela empresa que fornece a argila)
<b>ASO + Ravi</b>	Argila sem óleo com resíduo de aviário
<b>ASO + Comp</b>	Argila sem óleo com composto

A preparação das misturas teve início com a fragmentação manual e a crivagem da matéria orgânica (resíduo de aviário e o composto) numa malha de 250 µm. De seguida, com o auxílio de uma extrusora manual, misturaram-se os diferentes componentes de forma a obter as misturas desejadas cuja humidade ronda os 20%.

As bolas, com massa de cerca de 2,5g, foram manualmente conformadas e secas numa estufa a 130°C durante 2 horas. Seguiu-se uma passagem, de cerca de 2 horas, numa mufla a 230°C e, posteriormente, a rápida transferência para o forno que já se encontrava à temperatura de queima, 1180°C. Após um período de 15 minutos de



permanência no forno a 1180°C, as bolas foram retiradas do forno e, bruscamente, arrefecidas quando colocadas à temperatura ambiente.

Os agregados obtidos foram sujeitos a diversos ensaios, com vista à determinação da sua densidade aparente, ( $\rho$ ), capacidade de absorção de água, (AA), e da resistência à compressão, ( $\alpha_m$ ).

Para determinar a densidade aparente destes agregados e evitar a absorção de água, foram colocados oito corpos de prova, isto é, oito bolas de cada uma das misturas em estudo, numa estufa a 120°C durante um período de 2 horas. Procedeu-se à medição da massa, ( $m$ ), de cada um dos oito corpos de prova. De seguida, esses corpos de prova foram, individualmente, colocados, juntamente com 200ml de areia fina, numa proveta que, posteriormente, foi batida dez vezes. Terminada esta etapa de acomodação da areia, no interior da proveta, procedeu-se à leitura do volume do conjunto, ( $V_f$ ). Medidas as grandezas massa e volume de todos os corpos de prova, determinou-se a densidade aparente de cada um deles recorrendo à expressão matemática representada na equação 3.1.

$$\rho = \frac{m}{V_f - 200} \quad \text{Eq: 3.2}$$

A determinação da absorção de água requereu uma secagem prévia dos corpos de prova durante um período de 2 horas à temperatura de 120°C, seguido da medição da sua massa (obtenção do valor  $m_{seco}$ ). Os agregados foram, então, colocados em água fervente, também por um período de 2 horas, e, posteriormente, transferidos para água fria, durante 1 hora. Terminadas estas etapas teve lugar a remoção da água superficial, por contacto com um pano húmido, e uma nova medição de massa (obtenção do valor  $m_{húmido}$ ). A equação 3.2. permite calcular a absorção de água dos agregados em estudo.

$$\% AA = \frac{m_{húmido} - m_{seco}}{m_{seco}} \times 100 \quad \text{Eq: 3.3}$$

No que diz respeito à resistência à compressão, utilizaram-se quatro bolas por cada mistura em estudo, admitindo-se, para todas, a forma geométrica de uma esfera perfeita. Mediu-se o diâmetro de cada amostra, ( $d$ ), e de seguida, com o auxílio de uma máquina universal de ensaios mecânicos, estimou-se a força de ruptura por esmagamento, ( $P$ ), suportada pelos agregados. Os valores da resistência à compressão, ( $\alpha_m$ ), foram obtidos pela equação 3.3.

$$\alpha_m = \frac{2,8 \times P}{\pi d^2} \quad \text{Eq: 3.4}$$

De salientar ainda que os agregados foram analisados, morfológicamente, a olho nu. A inspecção da morfologia exterior permitiu verificar a existência de uma camada vítrea, enquanto a inspecção da morfologia interior dos agregados permitiu determinar o número de poros, medir a sua dimensão e verificar a existência de interligações entre eles.

### 3.3. Resultados e discussão

#### 3.3.1. Caracterização de materiais

Do conjunto de análises, anteriormente, efectuadas ao resíduo de aviário e ao composto, apresentam-se agora, na tabela 3.2, apenas os valores referentes ao pH, ao teor de humidade e ao teor de sólidos voláteis.

Tabela 3.2: Caracterização quanto aos parâmetros pH, humidade e sólidos voláteis do resíduo de aviário e do composto.

Parâmetro avaliado	Tipo de resíduo	
	Aviário	Composto
pH	9,83	9,01
Humidade (%btq)	28,35	71,9
Sólidos Voláteis (%bs)	82,9	70,5

Da análise da tabela 3.2, observa-se que o resíduo de aviário apresenta teor de humidade bastante inferior ao composto, mas um teor de sólidos voláteis superior. Refira-se que o parâmetro humidade não é tão preponderante no processo piroexpansivo das argilas como o teor de sólidos voláteis.

A observação e interpretação do difractograma de raios X (DRX), na figura 3.1., permite conhecer a composição mineralógica da argila. A argila utilizada nas composições em estudo (ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp) é constituída por caulinite (argilomineral de aluminossilicato hidratado), muscovite (mica) e sanidine (feldspato), tal como indicam os picos de tons diferentes.

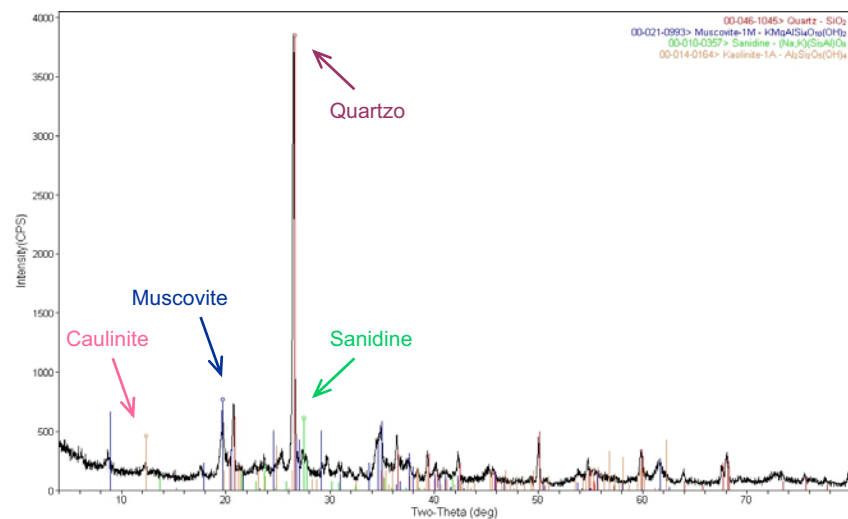


Figura 3.1: Curvas correspondentes à análise térmica diferencial (ATD) e à análise térmica gravimétrica (TG).

O comportamento térmico da argila é revelado através das curvas correspondentes à análise térmica diferencial (ATD) e à análise térmica gravimétrica (TG), seguidamente apresentadas na figura 3.2.

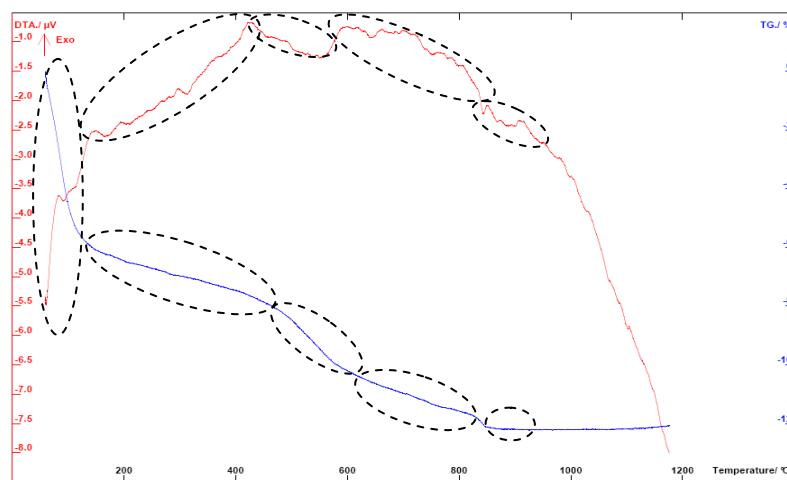


Figura 3.2: Curvas correspondentes à análise térmica diferencial (ATD) e à análise térmica gravimétrica (TG).

A interpretação destas curvas permite identificar e classificar, sob o ponto de vista energético, as reacções químicas que ocorrem durante a cozedura da argila, bem como compreender as etapas intermédias, pelas quais esta passa, até se transformar num agregado leve.

A observação dos diferentes patamares de temperatura, atingidos pela argila, indica que: até aos 150°C, se verifica a libertação de água por secagem da argila, o que provoca uma redução significativa da massa da amostra. Nesta fase, e uma vez que

existe absorção de energia, as reacções são endotérmicas; no intervalo entre os 150°C e os 450°C, ocorre um primeiro fenómeno de decomposição de matéria orgânica. Consequentemente, verifica-se uma nova diminuição da massa da amostra e, desta feita, a libertação de energia, o que permite afiançar que as reacções são exotérmicas; entre os 450°C e os 600°C, detecta-se a desidratação das estruturas dos minerais que constituem as argilas e a respectiva perda de massa. Estas reacções desenrolam-se com absorção de energia, sendo por isso classificadas de endotérmicas; no patamar de temperaturas entre os 600°C e 850°C, ocorre um outro fenómeno de decomposição de matéria orgânica, vulgarmente detectado nas argilas piroexpansivas. Estas reacções de decomposição da matéria orgânica, exotérmicas, além da libertação de energia provocam a diminuição da massa de argila em estudo; atingidos os 850°C, sucedem-se reacções, endotérmicas, de decomposição dos carbonatos, presentes na argila, que originam ainda, uma ligeira diminuição da massa da amostra; ultrapassados os 850°C surgem sinais de um suave aumento da massa da amostra, facto atribuído à reacção de redução do óxido de ferro, equação 3.5, presente na argila e com função relevante no processo piroexpansivo.



### 3.3.2. Morfologia dos agregados

A figura 3.3 mostra as fissuras que se formam nestes agregados pelo facto de não terem sido cozidos num forno rotativo. As fissuras surgem na zona de contacto entre o agregado e a soleira do forno.



Figura 3.3: Fissura observada nos agregados leves após cozedura.

Estas fissuras, genericamente, não são detectáveis aquando da produção industrial destes agregados, uma vez que a cozedura em forno rotativo não promove a manutenção de nenhuma área de contacto fixa / privilegiada entre as bolas a cozer e as

paredes do forno. Apesar do aparecimento das fissuras na zona de contacto entre o agregado e a soleira do forno não rotativo, das diferentes misturas utilizadas, todos os agregados obtidos neste trabalho apresentam, de acordo com a figura 3.4, uma forma esférica e uma estrutura vitrificada acastanhada.



Figura 3.4: Aspecto exterior do agregado padrão ACO.

A formação deste revestimento impermeável é decisiva no processo de expansão das bolas, visto que promove a retenção dos gases libertados, no seu interior e, posteriormente, a capacidade de absorção de água dos agregados. Observa-se também que, de todas as amostras em estudo, as de maior dimensão são aquelas cuja constituição é unicamente argila e óleo (ACO – composição padrão). A figura 3.5 permite observar ainda, para além do fenómeno do coração negro, que, o número e a dimensão dos poros que, constituem a estrutura porosa interna dos agregados ACO, é superior ao observado nas estruturas porosas das outras formulações testadas, facto que influencia os valores da densidade aparente e da resistência à compressão dos mesmos.



Figura 3.5: Aspecto interno do agregado ACO – visualização do coração negro e da estrutura porosa.

Na figura 3.6 observa-se o interior de um agregado constituído pela mistura de argila e composto (ASO+Comp). Verifica-se, tal como anteriormente referido, que os poros formados no interior deste agregado (ASO+Comp) se apresentam em número inferior e com menor dimensão, quando comparados com os existentes no agregado de composição padrão (ACO).

Não tão intensamente como no agregado padrão, também neste caso se observa uma zona central ligeiramente mais escurecida, o coração negro, fenómeno benéfico para o incremento da resistência mecânica dos agregados leves e habitual em misturas ricas em matéria orgânica e que contêm óxido de ferro.



Figura 3.6: Aspecto interno do agregado ACO+Comp – coração negro e estrutura porosa.

### 3.3.3. Características físicas e mecânicas

Da análise da tabela 3.3, constata-se que, relativamente à densidade aparente, todos os agregados produzidos apresentam valores inferiores ao valor teórico de referência para os agregados leves,  $0,7 \text{ g/m}^3$ .

Tabela 3.3: Densidade aparente dos agregados produzidos á custa das misturas ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp.

Tipo de mistura	Densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ )
ACO	0,36
ASO + Ravi	0,58
ASO + Comp	0,54

Observam-se valores significativamente diferentes de densidade aparente entre o agregado padrão e os agregados com os resíduos agora incorporados. Entre estes a diferença é ténue, mas a densidade do material contendo ASO+Comp é inferior. Embora o composto apresente um teor de sólidos voláteis inferior ao resíduo de aviário, a perda

total de peso sofrida pelo material durante a queima é ligeiramente superior à que sofre o resíduo de aviário.

Na tabela 3.4, desta feita, apresenta-se a expressão matemática e as consequentes relações existentes de proporcionalidade entre as densidades dos agregados em estudo.

Tabela 3.4: Relação matemática e proporcionalidade entre as densidades aparentes dos agregados ASO+Ravi, ASO+Comp e o agregado padrão (ACO).

$\frac{1 - \rho_{\text{mistura padrão}}}{\rho_{\text{mistura}}} (\%)$	$\rho_{\text{ASO+Ravi}}$	$\rho_{\text{ASO+Comp}}$
$\rho_{\text{ASO}}$	37	34

Verifica-se que, em relação ao agregado da mistura padrão (ACO), os agregados com resíduos incorporados (ASO+Ravi e ASO+Comp) são entre 30 a 40% mais densos.

A percentagem de AA, apresentada na tabela 3.5, indicia o grau de porosidade aberta das amostras em estudo, permite antever a capacidade de impermeabilização da camada exterior e impermeabilizante dos agregados.

Nota-se uma tendência acentuada para a formação de fissuras, possivelmente em consequência da dimensão média elevada das partículas constituintes dos agentes expansivos adicionados. Mais uma vez, as diferenças entre os dois novos agregados são reduzidas, tanto mais que o erro associado às medições é de cerca de 6% (resultante das variações morfológicas das amostras). Ambos apresentam, no entanto, valores inferiores ao do agregado ACO.

Tabela 3.5: Absorção de água dos agregados produzidos á custa das misturas ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp.

Tipo de mistura	Absorção de água (%)
<b>ACO</b>	38
<b>ASO + Ravi</b>	28
<b>ASO + Comp</b>	26

A figura 3.7 apresenta a relação entre a densidade aparente e a capacidade de absorção de água dos agregados.

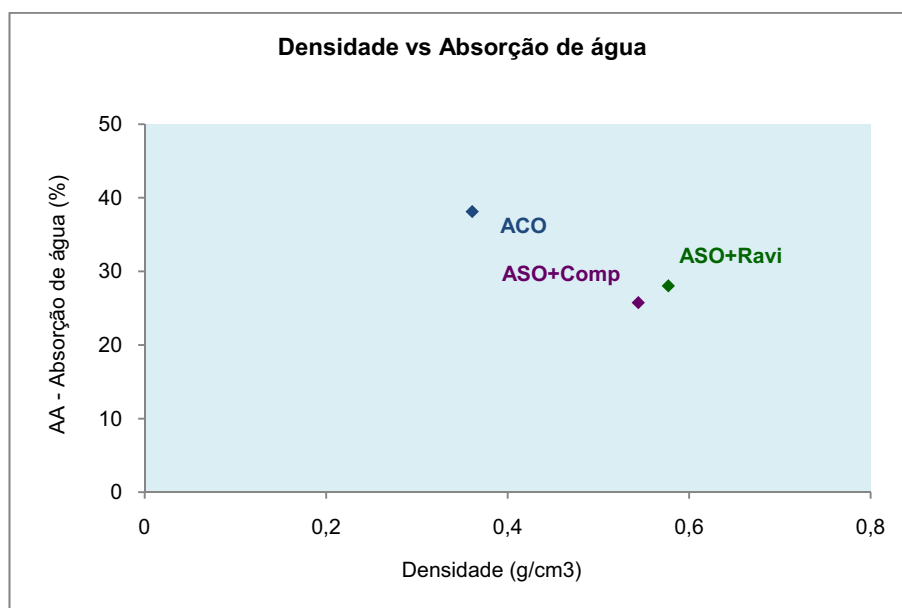


Figura 3.7: Relação entre a densidade e a absorção de água (AA) para os agregados leves em estudo (ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp).

Se comparados os agregados ASO+Ravi e ASO+Comp com o agregado padrão (ACO), verifica-se a validade da relação de proporcionalidade inversa entre a densidade aparente e a capacidade de absorção de água.

No que diz respeito à resistência à compressão, a nível industrial, os valores considerados adequados devem estar situados dentro do intervalo 0,6 a 2,2 MPa. Segue-se, na tabela 3.6, a apresentação dos resultados dos ensaios de resistência à compressão efectuados aos agregados em estudo.

Tabela 3.6: Resistência à compressão dos agregados ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp.

Tipo de mistura	Resistência à compressão (MPa)
<b>ACO</b>	0,15
<b>ASO + Ravi</b>	0,64
<b>ASO + Comp</b>	0,60

Os agregados com resíduo incorporado, quando comparados entre si, apresentam valores de resistência à compressão muito semelhantes e dentro do intervalo recomendado pelas especificações industriais. Por outro lado, a resistência do agregado ACO é substancialmente inferior, sendo até menor que o valor limite estabelecido para utilizações industriais. O efeito da densidade é relevante. Além disso, a ocorrência de interligação interna dos poros pode contribuir para fragilizar a estrutura.



A figura 3.8 fornece indicações acerca da relação de proporcionalidade entre a densidade dos agregados e a resistência à compressão.

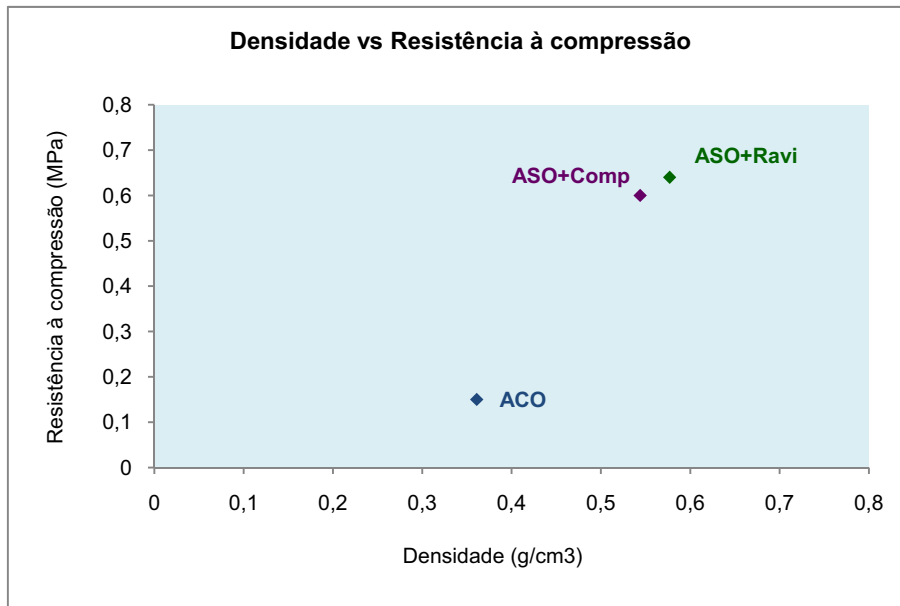


Figura 3.8: Relação entre a densidade e a resistência à compressão para os agregados leves em estudo (ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp).

Verifica-se, de forma inequívoca, a proporcionalidade directa entre a densidade e a resistência destes agregados e que, das três formulações estudadas, as que incorporam resíduos são as mais equilibradas, na relação de compromisso entre densidade e resistência à compressão.

Na tabela 3.7 apresentam-se os dados que permitem a comparação entre a resistência mecânica e a densidade aparente em cada uma das misturas em estudo.

Tabela 3.7: Comparação entre a resistência mecânica e a densidade aparente para cada um dos agregados em estudo (ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp).

Tipo de mistura	Resistência à compressão (MPa)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
<b>ACO</b>	0,15	0,36
<b>ASO + Ravi</b>	0,64	0,58
<b>ASO + Comp</b>	0,60	0,54

O agregado padrão, ACO, apresenta uma relação entre o esforço à compressão e a densidade cerca de duas vezes inferior à que se verifica nos agregados ASO+Ravi e ASO+Comp. Quanto comparados, os dois agregados com resíduo incorporado apresentam valores semelhantes entre si e ligeiramente superiores à unidade. Estas razões estão representadas na figura 3.9.

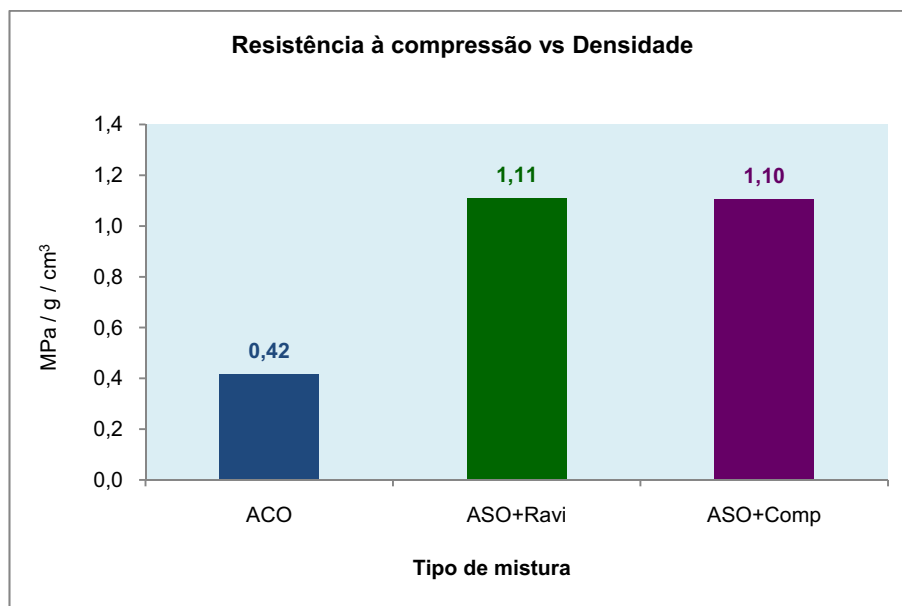


Figura 3.9: Relação entre a resistência à compressão e a densidade para os agregados leves em estudo (ACO, ASO+Ravi e ASO+Comp).

A análise desta figura 3.9 reforça a interpretação da figura 3.8. De forma igualmente clara se verifica que, das três formulações estudadas, as que incorporam resíduos são as mais equilibradas, na relação de compromisso entre densidade e resistência à compressão.

### 3.4. Conclusões

O trabalho desenvolvido nesta fase testou a incorporação de dois resíduos orgânicos (resíduo de aviário e composto, resultante da degradação de lamas secundárias de ETAR de celulose e de resíduo de aviário), enquanto agentes expansivos, na formação de agregados leves de argila expandida, com aplicação na construção civil.

Da realização dos ensaios e da análise dos resultados conclui-se essencialmente que:

atendendo às elevadas dimensões médias das partículas de cada um dos resíduos, não é possível incorporá-los na argila, sem antes se efectuarem operações de cominuição das partículas, algo que não se afigura difícil considerando a frágil coesão dos resíduos;

as condições de queima mais adequadas para a produção destes agregados correspondem a ciclos rápidos. Saliente-se que tais condições podem, sem grandes constrangimentos, ser reproduzidas, em forno rotativo, para a produção de agregados leves à escala industrial;

a temperatura ideal máxima de queima, das misturas em estudo, para a produção destes agregados é de 1180°C. De referir que, até se atingir a temperatura de 1200°C, não se registam alterações preocupantes, no que concerne o excessivo comportamento de expansão e vitrificação;

o tempo de exposição, à temperatura máxima, não deve exceder 15 minutos, para garantir a máxima expansão e a vitrificação superficial adequada;

de entre os teores de resíduo adicionados à argila, 3, 5 e 10% em massa, o menor valor, 3%, garante a obtenção de agregados leves com melhor desempenho resistência/leveza;

o uso de 5 ou 10% de resíduo apenas induz ligeiras alterações aos agregados obtidos, o que reforça a tolerância composicional na incorporação dos novos agentes expansivos;

o agregado produzido com a mistura de argila e composto revela um maior equilíbrio entre densidade, absorção de água e resistência à compressão.

## Referências

Bauer, L. A. F. (2000). *Materiais de Construção I. Livros Técnicos e Científicos* (5ª Edição). Brasil, Editora LTC (Grupo GEN).

Coungny, G. (1990). *Specifications sur les Matières Premières Argileuse pour la Fabrication de Granulats Légers Expanses*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur. France, Paris, 41:47-55.

Damiani, J. C.; Perez, F.; Melchiades, F. G.; & Boshi, A. O. (2001). Coração Negro em Revestimentos Cerâmicos: Principais Causas e Possíveis Soluções. *Cerâmica Industrial*, Março/Abril, 6(2): 12-16.

De Gennaro, R ; Cappelletti, P. ; Cerri, G. ; de Gennaro, M. ; Dondi, M. ; Langella, A. (2004). Zeolitic Tuffs as Raw Materials For Lightweight Aggregates. *Applied Clay Science*, 25: 71-81.

Fakhfalk, E.; Barros, O.; Medhioub, M.; Rocha, F.; Gomes, C.; Marques, J.; Coroado, J.; Kooli, F.; Zargouni, F. E; & Jamoussi, F. (2004). Comparative Appraisal of Tunisian and Portuguese Smectitic Clays as Raw Materials for the Production of Light Weight Aggregates. *Clay Science 12 Supplement*, 2: 113-118.

H. Thomas A. (1994). Lightweight Concrete and Aggregates. *American Society for Testing and Materials*, 48: 522-532.

Lourenço, J.; Júlio, E.; & Maranha, P.; (2004). *Betões de Agregados Leves de Argila Expandida – Guia para sua utilização*. Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto.

Monteiro, M. A.; Raupp-Pereira, F.; Ferreira, V. M.; Dondi, M.; & Labrincha J. A.(2005). Lightwheight aggregates based on industrial wastes. *Industrial Ceramics*, 25(3): 71-77.

Pinto, S.; Almeida, M.; Correia, A. M. S.; Labrincha, J. A.; Ferreira, V. M.; & Rosenbom, K. (2004b). *Study of the environmental impact of lightweight aggregates production incorporating cellulose industrial residues*. Proc. RILEM 2004 - Conference on the Recycled Materials in Building and Structures, November 9-11. Spain, Barcelona, 2: 771-77.

Pinto, S.; Rosenbom, K.; Machado, L.; Correia, A. M. S.; Labrincha, J. A.; & Ferreira, V. M. (2004a). *Recycling of industrial wastes in lightweight aggregates production*. Proc. REWAS 2004 - Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, Sept. 26-29. Spain, Madrid, 3: 2817-18.

Riley, C. M. (1951). Relation oh Chemical Properties to the Bloating of Clays. *Journal of the American Ceramic Society*, April, 34(4): 121-128.

São Marcos, P.; Labrincha, J. A.; & Rosenbom, K. (2002). *Incorporation of biologicalpaper-pulp sludge on expanded clay formulations*. Proceedings of 10th International Ceramic Congress – CIMTEC. Itália, Florença, Science for New Technology of Silicate Ceramics, 5: 337-44.

Smith, M. R.; & Collins, L. (1993). *Aggregates – Sand, Gravel and Crushed Rock Aggregates for Construction Purpose*. Geological Society Engineering, Geology Special Publication N° 9, (2nd Edition).

Weineckle, M. H.; & Faulkner, B. P.; (2002, November). Production of Lightwiegth Aggregate from Waste Materials. *Mining Engineering*, 54(11): 39-43.

#### **4. Conclusões gerais**

O trabalho realizado permite concluir que, a valorização das lamas, do resíduo de aviário e do engaço é conseguida recorrendo à valorização orgânica - compostagem - e à valorização material - produção de agregados leves.

Em regime de co-compostagem é possível produzir um composto com qualidade que, aplicado no solo, beneficia o crescimento das plantas e é passível de ser comercializado.

Os ensaios à escala laboratorial, em regime de arejamento forçado, indicam que o processo de co-compostagem reúne condições adequadas de humidade, nutrientes, pH e granulometria, a temperatura controlada, preferencialmente, próxima de 45°C, de forma a permitir a conservação do azoto, no composto final.

Concluiu-se ser possível realizar, com sucesso, a incorporação de resíduo de aviário e de composto (resultante da degradação da mistura de lamas de ETAR de celulose e de resíduo de aviário), enquanto agentes expansivos, na formação de agregados leves de argila expandida, para aplicação na construção civil.

A incorporação do composto (resultante da degradação da mistura de lamas de ETAR de celulose e de resíduo de aviário), no processo de produção de agregados leves, torna-se mais vantajosa do que a incorporação de resíduo de aviário. Para além de se apresentar como um material estabilizado (inodoro), com teor de humidade relativamente reduzido, o composto, possibilita ainda a valorização das lamas que, em estágio bruto, possuem um teor de humidade excessivo, o que dificulta o processo produtivo dos agregados.

Tabela A1 - Resumo da monitorização dos parâmetros estudados no ensaio 1 a 45°C

Ensaio 1	Mistura/Abertura									
	LA1_45					LAE1_45				
Parâmetro/Abertura	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Tempo de reacção (h)	70	214	382	511	70	214	382	511		
Massa seca (g)	440	402	345	314	491	416	360	344		
Teor de humidade (%btq)	71,72	69,49	69,66	67,69	72,55	72,79	71,85	68,68		
Teor de sólidos voláteis (%bs)	77,25	74,74	71,92	71	77,62	75,64	73,38	73,18		
Grau de conversão de SV (%)	17,52	24,02	34,09	36,96	16,72	28,76	37,21	37,08		
Massa de SV retirada por amostragem (g)	12,73	10,73	13,26		11,11	11,57	13,21			
Volume de CO2 (dm³)	76,659	128,097	171,586	192,157	88,08	150,072	216,207	254,824		
Azoto Kjedhal (%bs)	3,6	---	---	3,5	3,3	---	---	3,7		
pH amostra sólida	8,8	9,42	9,24	9,34	9,08	9,57	8,93	9,18		
Volume de lixiviado (dm³)	85	97	42	34	68	42	59	45		
pH do lixiviado	9,16	8,89	8,7	8,84	8,5	8,88	8,75	8,86		
Volume de água adicionado (dm³)	0	0	0	0	0	0	0	0		

Tabela A2 - Resumo da monitorização dos parâmetros estudados no ensaio 1 a 55°C

Ensaio 1	Mistura/Abertura							
	LA1_55				LAE1_55			
Parâmetro/Abertura	1	2	3	4	1	2	3	4
Tempo de reacção (h)	70	214	382	510	70	214	382	511
Massa seca (g)	417	364	323	290	486	431	397	387
Teor de humidade (%btq)	66,4	63,65	57,95	51,58	70,54	65,89	56,44	46,56
Teor de sólidos voláteis (%bs)	76,93	74,54	72	71,46	78,29	74,34	72,7	71,64
Grau de conversão de SV (%)	21,29	30,76	37,37	40,87	17,03	27,51	31,82	30,51
Massa de SV retirada por amostragem (g)	10,97	11,65	17,81		11,2	12,19	17,13	
Volume de CO2 (dm <sup>3</sup> )	56,964	106,904	130,843	137,794	78,436	140,016	174,433	183,896
Azoto Kjedral (%bs)	3,6	---	---	2,5	3,3	---	---	2,4
pH amostra sólida	9,27	9,48	9,23	9,44	9,23	9,54	9,5	9,51
Volume de lixiviado (dm <sup>3</sup> )	153	121	82	49	130	115	75	68
pH do lixiviado	9,33	8,99	8,94	8,91	9,08	8,96	8,89	9,11
Volume de água adicionado (dm <sup>3</sup> )	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabela A3 - Resumo da monitorização dos parâmetros estudados nas misturas do ensaio 2

Ensaio 2	Mistura/Abertura							
	LA2_45				LAE2_45			
Parâmetro/Abertura	1	2	3	4	1	2	3	4
Tempo de reacção (h)	57	201	369	537	57	202	369	537
Massa seca (g)	417	370	323	287	394	348	330	294
Teor de humidade (%btq)	66,53	66,27	69,61	71,9	66,58	66,83	66,32	67,55
Teor de sólidos voláteis (%bs)	76,04	74,15	72,19	70,49	77,6	75,93	73,17	72,36
Grau de conversão de SV (%)	14,09	22,22	30,41	36,49	20,24	28,11	31,50	36,82
Massa de SV retirada por amostragem (g)	12,86	10,87	8,18		11,22	9,73	8,29	
Volume de CO2 (dm³)	72,034	116,767	142,8	163,044	81,95	142,158	171,076	195,757
Azoto Kjedral (%bs)	4,5	---	---	4,8	4,2	---	---	4,5
pH amostra sólida	9,43	9,47	9,29	9,01	9,55	9,55	9,37	9,29
Volume de lixiviado (dm³)	151	104	60	65	131	80	65	91
pH do lixiviado	8,44	9,32	8,9	9,01	8,47	9,52	9,08	8,93
Volume de água adicionado (dm³)	100	250	100	0	100	200	100	0

Tabela A4 - Resumo da monitorização dos parâmetros estudados nos substratos do ensaio 2

Ensaio 2	Mistura/Abertura							
	A2_45				E2_45			
Parâmetro/Abertura	1	2	3	4	1	2	3	4
Tempo de reacção (h)	58	201	370	538	57	201	370	535
Massa seca (g)	491	424	394	352	253	234	225	190
Teor de humidade (%btq)	65,07	65,76	65,66	63,3	70,18	71,48	70,66	74,79
Teor de sólidos voláteis (%bs)	81,02	79,29	77,56	75,88	94,79	93,94	94,02	94,35
Grau de conversão de SV (%)	11,92	22,95	27,32	33,55	7,44	9,18	7,41	14,32
Massa de SV retirada por amostragem (g)	12,07	10,44	10,4		15,34	12,14	15,17	
Volume de CO2 (dm³)	74,635	124,21	157,438	189,414	0	3,201	16,002	21,058
Azoto Kjedral (%bs)	2,6	---	---	3,2	1	---	---	1
pH amostra sólida	9,65	9,78	9,92	9,76	4,04	4,13	4,64	4,59
Volume de lixiviado (dm³)	212	181	70	95	0	46	21	28
pH do lixiviado	9,7	9,5	9,12	8,57	0	4,03	4,42	5,21
Volume de água adicionado (dm³)	250	350	0	0	150	220	100	0